

Laura Raerinne

FERROKROMIKUONAERISTERAKEN- TEEN KUORMITUSKESTÄVYYSMITOI- TUS

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Laura Raerinne: Ferrokromikuonaeristerakenteen kuormituskestävyysmitoitus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka, DI
Kesäkuu 2019

Tässä työssä perehdyttiin ferrokromikuonaeristeeseen, kaupalliselta nimeltään OKTO-eristeeseen, palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen sekä ferrokromikuonaeristerakenteen kuormituskestävyysmitoitukseen. OKTO-eristettä syntyy, kun ferrokromin valmistamisen yhteydessä syntynyttä kuonaa granuloidaan paineellisen vesisuihkun avulla. OKTO-eriste on karkearakeinen, hyvin vettä johtava materiaali ja ominaisuuksiensa vuoksi sitä voidaan käyttää esimerkiksi tie- ja katurakenteen suodatinkerroksessa. Osana työtä esitettiin OKTO-eristeeseen valmistusprosessi ja OKTO-eristeeseen ominaisuuksia sekä OKTO-eristeeseen rakennettavuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Työn päätarkoituksena oli selvittää, mitä E-moduulin arvoa OKTO-eristeelle voidaan käyttää Odemarkin laskentakaavan käyttöön perustuvassa tie- ja katurakenteen kuormituskestävyysmitoituksessa. Tie- ja katurakenteen kuormituskestävyysmitoituksen tavoitteena on estää raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu ja pysyvät muodonmuutokset rakennekerroksissa ja pohjamaassa. Karkearakeisten tie- ja katurakennusmateriaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavat monet samat tekijät kuin palautumattomaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi tiiviys, vesipitoisuus ja jännitystaso. Tierakenteen tierakennemateriaalien kykyä vastustaa palautumattomien muodonmuutosten kertymistä voidaan tietäen varauksin arvioida materiaalien palautuvan muodonmuutoskäyttäytymisen perusteella.

OKTO-eristeeseen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä verrattiin vertailuhiekkan palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen sekä koerakenteista tehtyjen mittausten että laboratoriokokeiden perusteella. Osana työtä tarkasteltiin karkearakeisten tierakennemateriaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä kirjallisuuskatsauksen keinoin. Näitä tuloksia yleistettiin tietäen varauksin koskemaan myös OKTO-eristeeseen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä.

Koerakenteet rakennettiin osaksi jalankulku- ja pyörätietä. Kahdessa koerakenteessa käytettiin suodatinkerroksessa hiekkaa ja kahdessa koerakenteessa OKTO-eristettä. Hiekan E-moduuli vaihteli sen rakeisuuskäyrän perusteella 50...70 MPa:n välillä. Suodatinkerrosten paksuudet vaihtelivat, mutta yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen sekä päällysteen paksuudet olivat kaikilla koerakennneosuuksilla samat. Koerakenteista tehtiin tiiviysmittauksia ja levykuormituskokeita valmiin suodatinkerroksen pinnalta sekä levykuormituskokeita ja pudotuspainolaitemittauksia valmiin kantavan kerroksen päältä. Näillä tutkimuksilla arvioitiin muun muassa koerakenteiden tiivistymisen onnistumista sekä olosuhteiden vaikutusta koerakenteiden pinnalta tehtyihin kantavuusmittaustuloksiin. Valmiin kantavan kerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulosten perusteella tehdyt laskennat puoltavat sitä, että hyvin tiivistetylle OKTO-eristeelle voidaan Odemark-laskennassa käyttää E-moduulina 100 MPa.

OKTO-eristeelle ja rakeisuuskäyrän perustella 100 MPa:n vertailuhiekalle tehtiin syklisiä ja staattisia kolmiakselialikokeita materiaalien lujuusominaisuuksien ja jäykkyysmoduulien määrittämiseksi. Vertailukelpoisissa olosuhteissa OKTO-eristeeseen ja vertailuhiekkan palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaavat jäykkyysmoduulit olivat mittaustarkkuuden puitteissa toisiaan vastaavat. Tämä tulos tukee koerakenteiden perusteella tehtyä oletusta siitä, että OKTO-eristeelle voidaan käyttää kuormituskestävyysmitoituksessa 100 MPa:n E-moduulia.

Avainsanat: opinnäytetyö, granuloitu ferrokromikuona, ferrokromikuonaeriste, OKTO-eriste, uusiomateriaalit, kuormituskestävyys, kuormituskestävyysmitoitus, karkearakeisen materiaalin palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Laura Raerinne: Structural design of road structures made using granulated ferrochrome slag
 Master's Thesis
 Tampere University
 Civil Engineering, MSc
 June 2019

The purpose of this master's thesis was to research resilient deformation behavior of granulated ferrochrome slag and principles of structural designing for road structures made using granulated ferrochrome slag. Ferrochrome slag is produced in ferrochrome production. Ferrochrome slag is processed to by-products and granulated molten ferrochrome slag (OKTO insulation) is one of these by-products. OKTO insulation is coarse-grained material and because of its properties, for example thermal insulating capacity, hydraulic properties and good load-bearing capacity, it is mainly used in drainage course in road structures. One part of this study was to describe manufacturing process of OKTO insulation.

One important goal of thesis was to update OKTO insulation's elastic module (E), which represents material's capacity to resist resilient deformations and which is used in designing road structures based on Odemark's formula. Heavy traffic loads cause permanent deformations to road structures and one goal of designing road structures is to minimize these deformations. Many same factors, like density, moisture content and stress level, have an affect to resilient deformation behavior and to permanent deformation behavior of coarse-grained materials. This is why to some extent coarse-grained material's capacity to resist permanent deformations can be evaluated by material's resilient deformation behaviour.

OKTO insulations's resilient deformation behavior was compared to reference sand's behavior. This comparison was done with the experimental structures and laboratory testing. Part of this work was a literature study of resilient deformation behavior of coarse-grained materials. These results were generalized with reservations to OKTO insulation's resilient deformation behavior.

Four experimental structures parts were built to Tornio, in part to the pedestrian and bicycle way. OKTO insulation or sand, which E -modulus varied 50...70 MPa, was used in drainage course and its thickness varied. Thickness of sub-base, base course and pavement was same in all parts. Falling weight deflectometer tests, density tests and plate bearing tests were done from the experimental structures. Test results was used to evaluate for example how compaction worked out and how circumstances affected plate bearing test results made from base course. Plate bearing test results made from base course was used to calculate E -modulus to OKTO insulation. These calculations were done with Odemark's formula and results prove, that it is reasonable to use 100 MPa for OKTO insulation's E -modulus, if structures are sufficiently compacted.

Static and cyclic triaxial tests were done to OKTO insulation and reference sand, which E -modulus was defined to be 100 MPa due to its grain size distribution. Cyclic triaxial tests were done to examine OKTO insulation's and reference material's stress-state dependent resilient modulus M_r . In comparable conditions OKTO insulation's resilient deformation behavior was very same than filter sand's behavior. That supports using 100 MPa for OKTO insulation's E -modulus when designing road structures with Odemark's formula.

Keywords: Master's Thesis, granulated ferrochrome slag, OKTO insulation, recycled materials, loading capacity, designing road structures, coarse-grained material's capacity to resist resilient deformations

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Aloitin tämän työn viidennen opiskeluvuoteni alkaessa. Viides ja viimeinen opiskeluvuoteni onkin ollut melko kiireinen ja sisältänyt hyvin paljon tietokoneella istumista myös työ- ja opiskelupäivien jälkeen. Tämän vuoksi omistan työni lapsilleni, jotka ovat antaneet minun istua tietokoneella myös iltaisin ja viikonloppuisin sekä toisaalta myös muistuttaneet olemassaolollaan minua siitä, että maailmassa on monia muitakin merkityksellisiä ja tärkeitä asioita kuin opiskelu. Kiitos kuuluu myös läheisilleni, jotka ovat tukeneet minua tämän työn aikana ja viettäneet aikaa lasteni kanssa, jotta olen saanut keskittyä hetken vain syklisten kolmiaksoaalikokeiden ja ferrokromituotannon kiehtovaan maailmaan.

Tämän työn tekemisen ovat minulle mahdollistaneet Destia Oy ja Outokumpu Chrome Oy. Haluankin kiittää ohjaajaani ja kollegaani Taina Rantasta lukuisiin pohdintoihini osallistumisesta ja työn tilaajapuolelta Juha Mustaniemeä siitä, että hän on OKTO-eristeen osalta kommentoinut työtäni. Erityisen kiitoksen haluan antaa professori Pauli Koli-sojalle, joka sai luotua kannustavan ilmapiirin jokaiseen palaveriin ja vastasi kärsivällisesti niihin moniin kysymyksiin, joita työn tekemisen aikana mieleeni tuli. Kiitän myös toista työni tarkastajaa, Nuutti Vuorimiestä, jonka kommenttien ja kysymysten ansiosta kiinnitin huomiota moniin sellaisiin geoteknisiin seikkoihin, joita en olisi muuten tullut ajatelleeksi.

Viimeiseksi haluan kiittää Tornion Kromitien työmaata koerakenteiden rakentamisen mahdollistamisesta ja työmaalla työskenteleviä henkilöitä siitä hyvästä asenteesta, jolla minut työmaalla otettiin vastaan. Erityisesti mieleeni jäi eräs lause työmaalta: ”Eihän se hommana iso ole, mutta aikaa siihen menee”. Tämä diplomityö taisi hommana olla vähän isompi ja kyllä sen valmistuminen aikaa sitten veikin.

Tampereella, 1.6.2019

Laura Raerinne

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TIERAKENNEMATERIAALIEN MUODONMUUTOSOMINAISUUDET	3
2.1 Joustava päällysrakenne.....	3
2.2 Tierakennemateriaaleihin kohdistuvat kuormitukset	5
2.2.1 Liikennekuormitus	5
2.2.2 Ympäristöolosuhteiden aiheuttama kuormitus	9
2.2.3 Kuormitusten aiheuttamat vauriot tierakenteessa	10
2.3 Tierakennemateriaalien muodonmuutokset.....	11
2.4 Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksien kuvaaminen	16
2.4.1 Kimmomoduuli E	16
2.4.2 Jäykkyysmoduuli M_r	17
2.4.3 Poissonin luku ν	18
2.5 Muodonmuutosmoduuleihin vaikuttavia tekijöitä.....	19
2.5.1 Jäykkyysmoduulin jännitystilariippuvuus	19
2.5.2 Kuormitus- ja jännityshistoria	23
2.5.3 Tiiviystila	24
2.5.4 Rakeisuusjakautuma	28
2.5.5 Rakeiden pinnan karkeus ja muoto	30
2.5.6 Tierakennemateriaalin mineraloginen koostumus ja laatu	31
2.5.7 Vesipitoisuus.....	31
2.5.8 Muut olosuhdetekijät	32
2.5.9 Alla olevan kerroksen muodonmuutosominaisuudet	32
2.6 Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksien määrittäminen.....	33
2.6.1 Laboratoriokokeet	33
2.6.2 In situ-mittaukset	36
3. TIERAKENTEEN KUORMITUSKESTÄVYYS	45
3.1 Kuormituskestävyyden käsite	45
3.2 Kuormituskestävyyssmitoitus	47
3.2.1 Yleisesti kuormituskestävyyssmitoituksesta	47
3.2.2 Tierakenteen kuormituskestävyyssmitoitus Suomessa	48
3.2.3 Katurakenteen kuormituskestävyyssmitoitus Suomessa	52
3.2.4 Suomessa käytetyn kuormituskestävyyssmitoituksen arviointia	52
3.3 Kuormituskestävyyteen liittyvät laadunvalvontamittaukset	52
3.4 Kuormituskestävyys uusiomateriaalien osalta	55
4. OKTO-ERISTE.....	57
4.1 OKTO-eristeen valmistusprosessi	58
4.1.1 Kaivos.....	58
4.1.2 Tehdas.....	60
4.2 Mineralogia	64
4.3 Laadunvalvonta.....	64
4.4 OKTO-eristeen ominaisuuksia	66

4.4.1 Tekniset ominaisuudet	66
4.4.2 Mekaaniset ominaisuudet	67
4.4.3 Lämpötekniset ominaisuudet ja routivuus	69
4.4.4 Hydrauliset ominaisuudet.....	69
4.4.5 Ympäristöominaisuudet.....	70
4.5 OKTO-eristeen käyttö infrarakentamisessa	71
4.5.1 Käyttökohteet.....	72
4.5.2 Olosuhdeherkkyys ja rakennettavuus.....	73
4.6 OKTO-eristeen kuormituskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä	75
5.KOERAKENTEET	76
5.1 Yleisesti koekohteesta	76
5.2 Koerakenteet.....	77
5.2.1 Koerakenteiden sijoittaminen	78
5.2.2 Koerakenteiden mitoitus.....	81
5.2.3 Koerakenteiden rakentaminen	83
5.3 Havaintoja OKTO-eristeen rakennettavuudesta	89
5.4 Mittaukset koerakenteista.....	93
5.4.1 Tiiviysmittausten tulokset	93
5.4.2 Levykuormituskokeiden tulokset	96
5.4.3 Pudotuspainolaitemittausten tulokset.....	107
5.5 OKTO-eristeen E-moduuli koerakenteiden perusteella.....	117
6.LABORATORIOTUTKIMUKSET	123
6.1 Tehdyt laboratoriotutkimukset	123
6.2 Laboratoriotutkimusten tulokset.....	126
6.3 OKTO-eristeen jäykkyyshmoduuli ja arvioitu E-moduuli laboratoriokokeiden tulosten perusteella.....	127
7.JOHTOPÄÄTÖKSET	130
7.1 OKTO-eristerakenteen kuormituskestävyys	130
7.2 Jatkoimenpidesuositukset	132
LÄHTEET	133
LIITE A: KOERAKENTEIDEN KUORMITUSKESTÄVYYS- JA ROUTAMITOITUS	138
LIITE B: TYYPIPOIKKILEIKKAUKSET KOERAKENTEISTA	139
LIITE C: KOERAKENTEISSA KÄYTETTYJEN MATERIAALIEN RAKEISUUSKÄYRÄT JA SUORITUSTASOILMOITUKSET	141
LIITE D: PROCTOR-TUTKIMUSTEN TULOKSET	147
LIITE E: HIEKKAVOLYMETRIKOKKEIDEN TULOKSET	151
LIITE F: TROXLER-MITTAUSTEN TULOKSET	152
LIITE G: SUODATINKERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN LEVYKUORMITUSKOKKEIDEN TULOKSET	153
LIITE H: KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN LEVYKUORMITUSKOKKEIDEN TULOKSET	155

LIITE I: KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN	
PUDOTUSPAINOLAITEMITTAUSTEN TULOKSET	179
LIITE J: KOLMIAKSIAALIKOKEIDEN TESTAUSSELOSTUS.....	182

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Kreikkalaiset kirjaimet

$\Delta\varepsilon$	suhteellinen muodonmuutos
θ	pääjännitysten summa ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, $\sigma_v + 2\sigma_h$)
θ_0	vertailujännitys
ν	Poissonin luku
ρ_d	kuivairtoteiheyys
$\rho_{d,max}$	maksimikuivairtoteiheyys
σ	jännitys, kosketuspaine
σ'	tehokas jännitys
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	pääjännitykset
σ_d	deviatorinen jännitys (pääjännitysten $\sigma_1 - \sigma_3$ erotus)
σ_h	hydrostaattinen jännitys (pääjännitysten keskiarvo)
σ_{max}	maksimikuormitus
σ_{min}	minimikuormitus
T_f	leikkauslujuus
γ_d	kuivatilavuuspaino
$\gamma_{d,max}$	maksimikuivatilavuuspaino
φ	leikkauskestävyyskulma (kitkakulma)
φ'	tehokas leikkauskestävyyskulma

Latinalaiset kirjaimet

a	kuormituslevyn säde
C_u	raekokosuhte
c	koheesio
c'	tehokas koheesio
d	raekoko
d_{10}	materiaalin rakeisuuskäyrän läpäisyprosentin 10 kohdalta määritetty raekoko
d_{60}	materiaalin rakeisuuskäyrän läpäisyprosentin 60 kohdalta määritetty raekoko
d_o	taipuma kuormituslevyn alla, keskitaipuma
d_r	taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä
D	tiiviysaste
D_{max}	maksimiraekoko
E	kimmomoduuli, muodonmuutosmoduuli
E_1, E_2	muodonmuutosmoduulit ensimmäiselle ja toiselle kuormitusylikille
E_A	mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus
E_Y	mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus
h	mitoitettavan kerroksen paksuus
k	kuormituslevyn jäykkyydestä ja kuormitetun materiaalin Poissonin luvusta riippuva vakio, joka vaihtelee 1,2...1,8 välillä (käytännössä käytetään arvoa 1,5)
K_1, K_2 ja K_3	tiettyyn tiiviys- ja kosteustilaan sidottuja materiaalivakioita
n	rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametri
M_r	jäykkyysmoduuli
P	läpäisyprosentti
p	kosketuspaine
s	painuma
r	kerroin, jonka arvo on $\pi/2$, jos levy oletetaan jäykäksi ja 2, jos levy oletetaan taipuisaksi
w	vesipitoisuus

LYHENTEIDEN JA TERMIEN MÄÄRITELMIÄ

BCI	pudotuspainolaitemittauksen taipumasuppilosta laskettava parametri, kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
E-moduuli	kuvaa materiaalin palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä, materiaalin palautuvan muodonmuutoksen ja sen aiheuttaneen jännityksen suhde
HK1, HK2	koerakenneosuudet, joissa suodatinkerroksessa käytettiin hiekkaa
jäykkyysmoduuli	kuvaa karkearakeisten materiaalien toistuvien kuormitusten jälkeen vakiintunutta palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä; materiaaliin vaikuttavasta jännitystilasta riippuva muodonmuutosmoduuli
kantavuus	koko tie- tai katurakenteen muodonmuutosmoduuli, joka kuvaa koko rakenteen kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia
KKL	kuormituskertaluku, kuvaa raskaan liikenteen aiheuttamaa rasitusta tierakenteeseen
kuormitus-kestävyysmitoitus	tien tai kadun päällysrakenteen mitoittaminen niin, että se pystyy ottamaan vastaan liikenteen kuormitukset ja jakamaan ne tasaisesti alusrakenteelle siten, että voidaan estää estää raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu ja pysyvät muodonmuutokset tien rakennekerroksissa ja pohjamaassa
MARA-asetus	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (VNa 843/2017)
Odemarkin laskentakaava	tie- ja katurakenteen kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävä laskentakaava
OKTO1, OKTO2	koerakenneosuudet, joissa suodatinkerroksessa käytettiin OKTO-eristettä
OKTO-eriste	sulasta ferrokromikuonasta granuloimalla eli rakeistamalla valmistettu kivituoite, jonka raekoon vaihtelualue on 0-11 mm
SCI	Pudotuspainolaitemittauksen taipumasuppilosta laskettava parametri, kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
syklinen kolmiaksaalikoe	yleisimmin käytetty laboratoriokoe karkearakeisen materiaalin jäykkyysmoduulin määrittämiseksi

1. JOHDANTO

Suomessa käytetään infrastruktuurin rakentamiseen noin 70 Mt neitseellisiä luonnon maa-aineksia vuodessa (Infra ry 2017, Huhtinen et al. 2018, s. 21 mukaan). Uusiomateriaalien käytön merkitys tie- ja katurakentamisessa on suuri, jos neitseellisiä kiviaineksia halutaan käyttää säästeliäästi.

Tässä työssä tarkastellaan yhden uusiomateriaalin, ferrokromikuonaeristeen (kaupallista nimeltään OKTO-eristeen), käyttöä tie- ja katurakenteissa. OKTO-eristettä valmistetaan rakeistamalla ferrokromin valmistamisen yhteydessä syntyvää ferrokromikuonaa paineellisella vesisuihkulla. OKTO-eristettä on käytetty maarakentamisessa jo vuosikymmenten ajan ja sen tyypillinen käyttökohde on tie- ja katurakenteiden suodatinkerroksessa. Osana tämän työn kirjallisuuskatsausta käydään läpi OKTO-eristeen valmistusprosessi sekä OKTO-eristeen ominaisuuksia.

OKTO-eristeen nykyiset mitoitusparametrit on määritetty 2000-luvun alkupuolella. Tämän jälkeen OKTO-eristeen tuotantomäärä on kaksinkertaistunut ferrokromin valmistamista varten tarvittavan kolmannen sulatusuunin käyttöön oton jälkeen. Tämän työn ja siihen liittyvien tutkimusten tarkoituksena on päivittää OKTO-eristeen tie- ja katurakenteiden kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävän E-moduulin arvo nykyistä tuotetta vastaavaksi. Kuormituskestävyysmitoitus on osa tie- ja katurakenteiden suunnittelua ja sen tavoitteena on varmistaa, että tien tai kadun rakennekerroksissa tai pohjamaassa ei synny liian suuria pysyviä muodonmuutoksia. Tämän työn painopiste on tie- ja katurakenteissa käytettävän joustavan päällysrakenteen sitomattomien karkearakeisten rakennekerrosten toiminnassa.

Tie- ja katurakenteiden toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaiset, joten vaikka tässä työssä selkeyden vuoksi puhutaan vain tierakenteista tai tierakennemateriaaleista, voidaan samat asiat yleistää myös katurakenteisiin. Selvät erot katu- ja tierakenteiden kuormituskestävyysmitoituksessa on pyritty esittämään.

Tierakenteen kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävä E-moduuli liittyy materiaalin palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Tämän työn kirjallisuuskatsauksessa esitellään tiivistetysti karkearakeisten sitomattomien tierakennemateriaalien palautuvaan muodonmuutokseen liittyviä tekijöitä. Karkearakeisen materiaalin muodonmuu-

tosominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä on tutkittu lähinnä luonnonkiviaineilla, mutta tuloksia pyritään mahdollisuuksien mukaan yleistämään myös OKTO-eristeen palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Osana kirjallisuuskatsausta tarkennetaan kuormituskestävyyden ja kantavuuden määritelmiä sekä käydään lyhyesti läpi kuormituskestävyysmitoituksen kulku Väyläviraston (ent. Liikennevirasto) Tierakenteen suunnitteluohjeen mukaan.

OKTO-eristeen muodonmuutosmoduulien päivitystä koskevaa tutkimusta varten rakennetaan osaksi Torniossa sijaitsevaa jalankulku- ja pyörätietä koerakenteet, joissa vertailupareina ovat eripaksuiset hiekka- ja OKTO-eristekerrokset. Koerakenteista tehtyjen kantavuusmittausten perusteella arvioidaan OKTO-eristeen E-moduulia. Koerakenteiden rakentamisen yhteydessä kiinnitetään huomiota myös työmaalla ilmeneviin OKTO-eristeen rakennettavuuteen vaikuttaviin tekijöihin, kuten OKTO-eristeen tiivistymiseen. OKTO-eristeelle ja vertailuhiekalle tehdään Tampereen yliopiston Maa- ja pohjarakennelaboratoriossa syklisiä kolmiakσιαalikokeita niiden muodonmuutosmoduulien määrittämiseksi. Lopuksi koerakenteista saatuja mittaustuloksia verrataan laboratoriokokeista saatuihin tuloksiin OKTO-eristeelle kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävän E-moduulin määrittämiseksi.

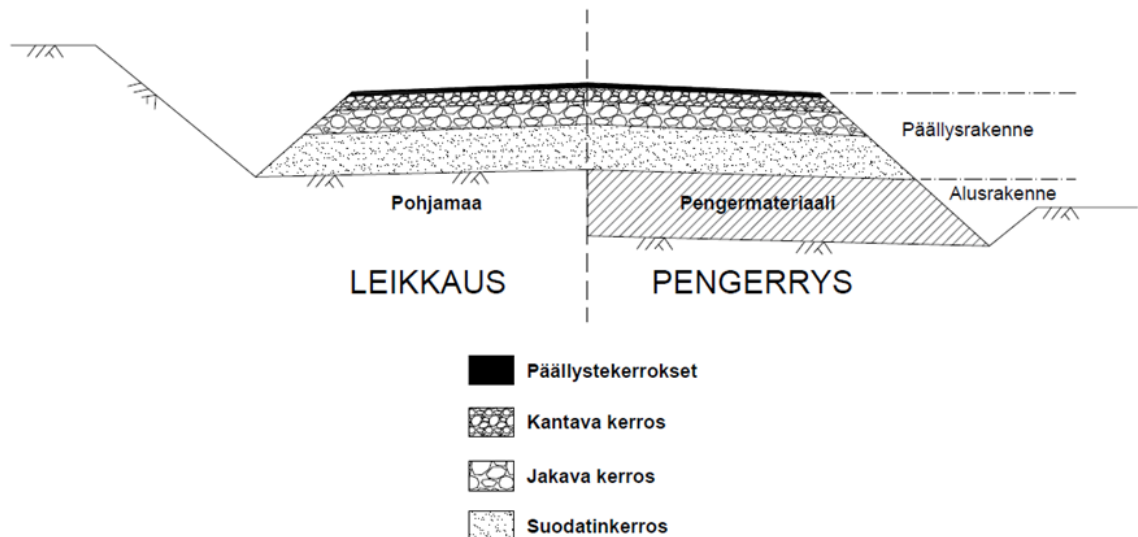
2. TIERAKENNEMATERIAALIEN MUODONMUUTOSOMINAISUUDET

Tässä kappaleessa tarkastellaan sitomattomien karkearakeisten tie- ja katurakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Sitomaton karkearakeinen materiaali koostuu suuresta määrästä rakeita, joiden välisten kontaktipisteiden kautta materiaaliin kohdistuvat jännitykset siirtyvät rakeelta rakeelle (Breccialori & Koli-soja 2006, s. 49). Tierakennemateriaalien palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä tarkastellaan luonnonkiviainesmateriaaleista tehtyjen tutkimustulosten perusteella. Tämän työn painopiste on toistuvan liikennekuormituksen aiheutumisissa muodonmuutoksissa.

2.1 Joustava päällysrakenne

Tie- ja katurakenteen tulee tarjota sitä pitkin kulkeville ajoneuvoille ja muille tien käyttäjille mahdollisimman tasainen ja turvallinen kulkualusta. Tie- ja katurakenteen tulisi pystyä ottamaan vastaan sekä liikenteen että ympäristön aiheuttamat kuormitukset ilman merkittäviä vaurioita. Normaalitapauksessa kuormitukset eivät kuitenkaan aiheuta tierakenteessa äkillisiä sortumia, vaan tierakenne vaurioituu pikkuhiljaa toistuvien kuormitusten vaikutuksesta. (Ehrola 1996, s. 135) Haastavaksi tierakenteen suunnittelun tekee se, että siihen kohdistuvat kuormitukset ovat keskenään erilaisia ja kohdistavat tierakenteeseen erilaisia jännityksiä. Tierakenteeseen kohdistuvista kuormituksista kerrotaan enemmän kappaleessa 2.2.

Suomessa käytetään yleensä joustavaa päällysrakennetta. Tällainen päällysrakenne on kerroksellinen rakenne, jossa on päällimmäisenä bitumisella sideaineella sidottu kerros ja alemmat rakennekerrokset ovat sitomattomia (Ehrola 1996, s. 138). Esimerkki tällaisesta tyypillisestä joustavasta päällysrakenteesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tyypillisen joustavan päälysrakenteen rakennekerrokset (perustuu Liikennevirasto 2018, s. 11).

Tyypillisesti joustavan päälysrakenteen kulutuskerros on sidottu. Joissakin tapauksissa myös kantavan kerroksen yläosa voi olla sidottu. Nämä sidotut kerrokset muodostavat rakenteen päälysteen. Kantavan ja jakavan kerroksen tulee muodostaa päälysteelle riittävän jäykkä alusta, jotta päälysteeseen kohdistuvat jännitykset eivät tule liian suuriksi. Lisäksi päälysteen alapuolisten rakenteiden tulee jakaa liikennekuormitukset riittävän laajalle alueelle, jotta alusrakenteeseen ei muodostu liian suuria muodonmuutoksia. (Koli 1993, s. 3; Ehrola 1996, s. 138-140)

Tierakenteen alapuolisen alusrakenteen ominaisuudet vaikuttavat päälysrakenteen rakenteisiin. Jollei tie ole penkereellä, alusrakenteella tarkoitetaan tierakenteen alla olevaa pohjamaata. Jos alusrakenne on tyypillisen jakavan kerroksen materiaalia karkeampaa ja routimatonta, ei jakavaa kerrosta tarvita. Kantava ja jakava kerros voidaan tehdä myös yhdistettynä samasta materiaalista. Suodatinkerros katkaisee veden kapillaarinen nousun ylempiin rakennekerroksiin sekä estää alusrakennetta ja päälysrakennetta sekoittumasta. Näin ollen suodatinkerros tarvitaan aina, kun alusrakenne voi routia. (Ehrola 1996, s. 138-140)

Kerroksellista rakennetta käytettäessä voidaan käyttää eri kerroksissa erilaatuisia materiaaleja, sillä liikennekuormituksesta aiheutuvat jännitykset ovat alemmissa rakennekerroksissa pienempiä kuin ylemmissä rakennekerroksissa. Lisäksi kerroksellisella rakenteella saadaan päälysrakenteelle riittävästi paksuutta routanousujen rajoittamiseksi ja tasaamiseksi. (Ehrola 1996, s. 139)

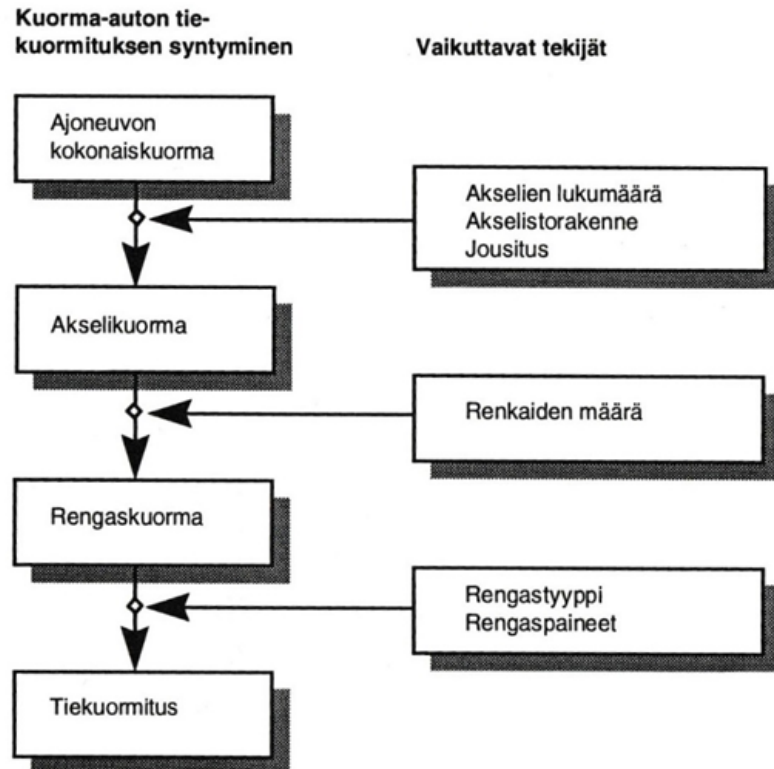
2.2 Tierakennemateriaaleihin kohdistuvat kuormitukset

Liikenteestä ja ympäristötekijöistä kohdistuu tierakenteeseen luonteeltaan ja suuruudeltaan erilaisia kuormituksia. Ne aiheuttavat tierakenteen eri osiin erilaisia jännityksiä ja jännityksistä johtuvia muodonmuutoksia, sillä tierakenteen tietyssä pisteessä vaikuttava jännitys riippuu sekä kuormituksen suuruudesta että tierakenteen muista rakennekerroksista ja niiden ominaisuuksista. (Ehrola 1996, s. 31; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 16)

2.2.1 Liikennekuormitus

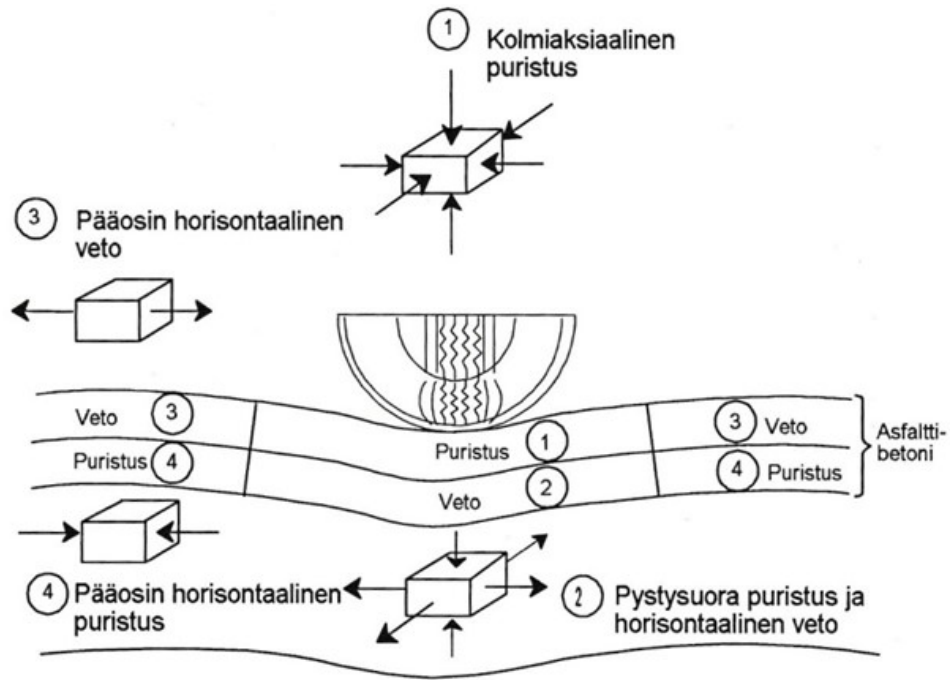
Teitä ja katuja kuormittavia moottoriajoneuvotyypppejä ovat moottoripyörät, henkilöautot, pakettiautot, linja-autot ja kuorma-autot. Kuorma-autot ovat tierakenteen mitoituksen ja tierakenteeseen syntyvien muodonmuutosten kannalta merkittävin ajoneuvokuormitus (Ehrola 1996, s. 32).

Liikennekuormitukselle on tyypillistä toistuva eli syklinen kuormitustapa sekä kuormituksen dynaamisuus eli ajoneuvot aiheuttavat kuormitusta liikkuessaan. Liikenneajoneuvoista voi aiheutua tierakenteeseen staattista kuormitusta niiden ollessa pysähdyksissä. (Kolisoja 1993, s. 7) Liikennekuormituksen välittyminen tierakenteeseen on monimutkainen prosessi. Yksinkertaistettusti voidaan todeta, että kuorma-auton kokonaiskuorma välittyy kuorma-auton jousituksen kautta kuorma-auton akseleille, akselien kautta renkaille ja lopulta renkaiden kautta tienpintaan. Ajoneuvon kuormitettu rengas painuu ajoradan pintaa vasten, jolloin renkaan litistytessä renkaan ja tienpinnan väliin muodostuu kosketuspinta, jonka kautta ajoneuvokuormitus siirtyy tienpintaan. (Ehrola 1996, s. 38-39) Jos tienpinta on tasainen ja ajoneuvo paikallaan, voidaan ajoneuvon pyörästä tierakenteeseen kohdistuva kuormitus määrittää hyvinkin tarkasti. Renkaan ja tien kosketuspinnan muoto ja kosketuspinnalla vallitseva paineen jakauma riippuu useista tekijöistä ja sen määrittäminen on vaikeampaa. Toisaalta sitomattomissa rakennekerroksissa vaikuttavia jännityksiä tarkastellessa voidaan renkaan ja tien välinen kosketuspinta käytännössä olettaa ympyrän tai ellipsin muotoiseksi ja vallitseva pintapaine tasan jakautuneeksi. Liikkuvan ajoneuvon tapauksessa kuormitus vaihtelee ajan suhteen ja siihen vaikuttaa vielä enemmän tekijöitä kuin staattisessa tilanteessa, kuten ajoneuvon nopeus, renkaiden ja jousitusten ominaisuudet sekä tien kaarteisuus. (Kolisoja 1993, s. 3-4) Liikennekuormituksen synty ja siihen vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kuorma-auton aiheuttaman kuormituksen välittyminen tierakenteeseen (Ehrola 1996, s. 38).

Kuormitetun renkaan alla tien pinta ja tierakenne taipuvat ja kuormituksesta aiheutuu erityyppisiä jännityksiä renkaan vaikutusalueelle. (Ehrola 1996, s. 39) Tyypilliset liikennekuormituksesta tierakenteeseen aiheutuvat jännitykset on esitetty kuvassa 3.

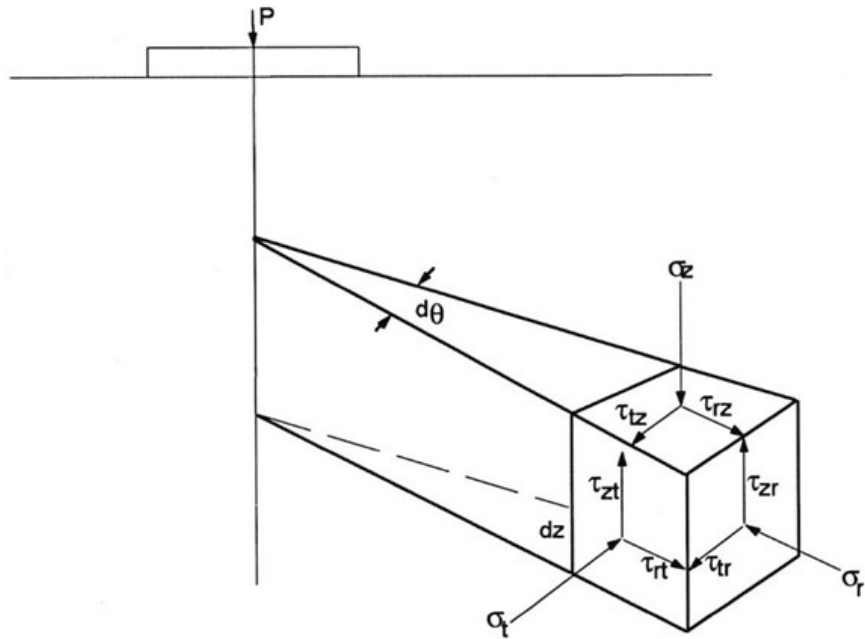


Kuva 3. Kuormitetun renkaan alla tapahtuva tien pinnan taipuminen ja siitä johtuvat jännitykset tiessä (Ehrola 1996, s. 40).

Sitomattomat tierakennemateriaalit eivät kestä vetoa, joten liikennekuormitus aiheuttaa sitomattomissa rakennekerroksissa ja alusrakenteessa kolmiakselista puristusta eli kuvassa 3 esitetyn tapauksen 1 mukaiset puristusjännitykset (Ehrola 1996, s. 40; Alkio et al. 2001, s. 16). Tierakenteen kestävyys kannalta kerroksellisessa tierakenteessa esiintyvät kriittisimmät jännitykset yleensä ovat vetojännitys sidottujen rakennekerrosten alareunassa ja pystysuora puristusjännitys alusrakenteen yläreunassa. Lisäksi ylimpään sitomattomaan kerrokseen kohdistuu suuria rasituksia. (Kolisoja 1993, s. 8; Ehrola 1996, s. 51)

Karkearakeiset sitomattomat tierakennemateriaalit kestävät hyvin suurehkoja puristusjännityksiä ja kohtuullisia leikkausjännityksiä, joten kerroksittain rakennettuna ja tiivistettynä tällaiset materiaalit kykenevät jakamaan liikennekuormitusta alla oleviin kerroksiin ja pohjamaahan. Liikennekuormituksen aiheuttamat jännitykset siirtyvät karkearakeisen materiaalin rakeelta toiselle rakeiden välisten kontaktipisteiden kautta. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 6, 49)

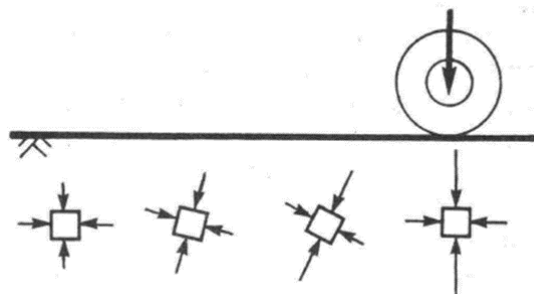
Kun tarkastellaan karkearakeisen tierakennemateriaalin tiettyä alkioita, synnyttävät liikennekuormitukset siihen yhdeksän erilaista jännityskomponenttia. Nämä jännitykset näkyvät kuvassa 4. Normaalijännitykset σ_z , σ_r ja σ_t suuntautuvat alkion sivuihin nähden kohtisuoraan. Leikkausjännitykset τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} ja τ_{zt} taas ovat alkion sivujen suuntaisia. (Ehrola 1996, s. 289)



Kuva 4. Materiaaliin kohdistuvat jännitykset (Ehrola 1996, s. 289).

Kun maa-alkio on suuntautunut siten, että alkion toisiaan leikkaavilla sivuilla vaikuttavat leikkausvoimat ovat yhtä suuret, kutsutaan normaali-jännityksiä pääjännityksiksi. Pääjännityksistä σ_1 on suuruudeltaan suurin pääjännitys, σ_2 keskimäinen pääjännitys ja σ_3 suuruudeltaan pienin pääjännitys. (Ehrola 1996, s. 289) Hydrostaattinen jännitys σ_h saadaan pääjännitysten keskiarvona. Aksiaalisymmetrisessä jännitystilassa deviatorinen jännitys σ_d saadaan pääjännitysten σ_1 - σ_3 erotuksena. (Laaksonen et al. 2004)

Liikkuva pyöräkuorma aiheuttaa sitomattoman rakennekerroksen maa-alkiossa pääjännitysten kiertymisen kuvan 5 mukaisesti (Ehrola 1996, s. 290). Pääjännitysten kiertymisellä on havaittu olevan vaikutusta lähinnä pysyvien muodonmuutosten syntymiseen (Chan 1990, s. 10-11).

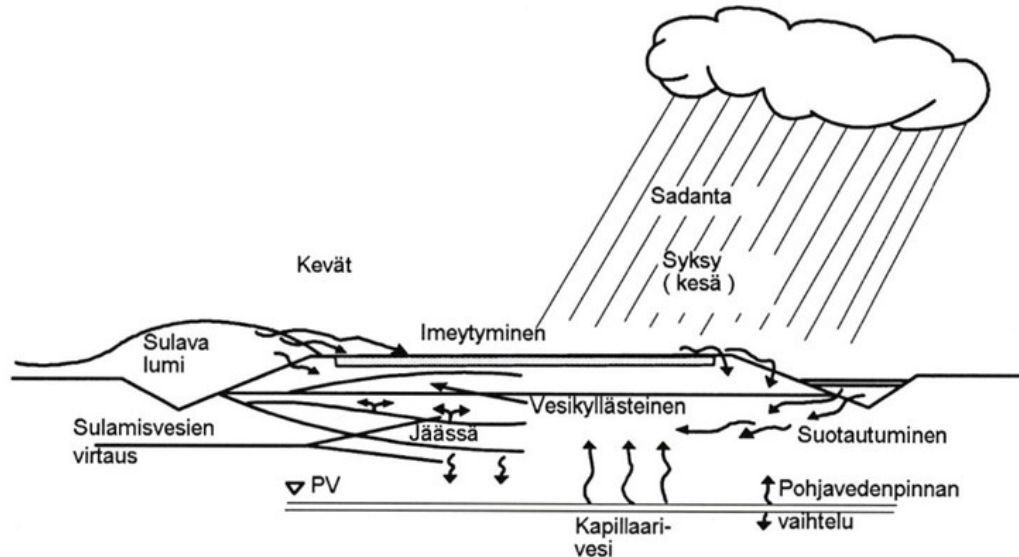


Kuva 5. Pääjännitysten kiertyminen tierakenteen maa-alkiossa liikennekuorman alla (Kolisoja 1993, s. 7).

2.2.2 Ympäristöolosuhteiden aiheuttama kuormitus

Ilmastosta ja sen muutoksista johtuen tierakenteeseen kohdistuu myös ympäristökuormituksia. Ympäristökuormitukset voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: lämpötilan, veden ja roudan aiheuttamiin kuormituksiin. Suomessa merkittävimmät sitomattomiin rakennekerrokseen vaikuttavia ympäristötekijät ovat lähinnä vesipitoisuus, tierakenteen jäätyminen sekä tierakenteen sulaminen. Alusrakenteeseen ja alusrakenteen kautta välillisesti myös päällysrakenteeseen vaikuttaa edellä mainittujen tekijöiden lisäksi myös routanousu. Lämpötila vaikuttaa sitomattomiin rakennekerrokseen tai alusrakenteeseen lähinnä vain maan jäätyamisen kautta. Ympäristökuormituksista aiheutuvat jännitykset ja muodonmuutokset tierakenteissa poikkeavat huomattavasti liikkuvan pyöräkuorman aiheuttamasta kuormituksesta. (Ehrola 1996, s. 81-82, 128, 290; Alkio et al. 2001, s. 35)

Vettä on tierakenteissa vapaana vetenä, kapillaarivetenä, sidottuna vetenä ja vesihöyrynä. Vapaan veden määrä vaikuttaa tierakenteen muodonmuutosominaisuuksiin eniten ja sen lisääntyminen aiheuttaa mm. tien rakennekerrosten lujuuden alentumista. Vapaata vettä voi päästä tierakenteeseen kuvassa 6 näkyvillä tavoilla. Vapaan veden määrään tierakenteessa on kuitenkin mahdollista vaikuttaa erilaisilla kuivatustoimenpiteillä. (Ehrola 1996, s. 119)



Kuva 6. Tietä kuormittavan veden alkulähteet (Ehrola 1996, s. 120).

Maan lämpötilan laskiessa riittävästi alle 0 °C maassa oleva vesi jäätyy. Vettä sisältävät maakerrokset kovettuvat veden jäätyamisen vuoksi ja näitä kovettuneita maakerroksia kutsutaan roudaksi. Routaantuminen tarkoittaa roudan muodostumista. Maan routiminen taas tarkoittaa sellaista routaantumista, jossa maan vesipitoisuus ja tilavuus kasvavat ja maanpinta kohoilee. Maan lämpötilan ollessa alle 0 °C kaikki maalajit routaantuvat, mutta

vain osa maalajeista routii. Tällaisia maalajeja ovat esimerkiksi hienoainespitoiset moreenit, siltti ja savi. (Rantamäki et al. 2007, s. 115) Jos tierakennemateriaaleissa on riittävästi hienoainesta ja tien kuivatus on puutteellinen, myös tierakennemateriaalit voivat routia. Toistuvat jäätymis- ja sulamissyklit saattavat rapauttaa tierakennemateriaaleja ja näin johtaa esimerkiksi materiaalin hienoainespitoisuuden kasvuun. (Alkio et al. 2001, s. 37)

2.2.3 Kuormitusten aiheuttamat vauriot tierakenteessa

Sekä liikenne- että ympäristökuormitus aiheuttavat tierakenteeseen vaurioita. Liikenne- ja ympäristökuormitukset vaikuttavat osittain yhtä aikaa ja voivat täten voimistaa toistensa vaikutuksia. Vaikka liikenneväylien vaurioiden taustasyyt voidaan jaotella ympäristö- tai liikennekuormituksesta johtuviksi, ei tällainen erottelu ole käytännössä kovinkaan selvä. Vauriot ovat osittain samanlaisia ja osittain nämä erityyppiset kuormitukset vaikuttavat yhdessä. (Ehrola 1996, s. 291)

Liikennekuormituksen aiheuttamia vaurioita ovat tierakenteen väsymisvauriot sekä tien epätasaisuuden kasvaminen. Epätasaisuutta voi esiintyä joko tien pituussuuntaisena epätasaisuutena tai tien poikkisuunnassa tien urautumisena. Tien väsymisvauriot johtuvat pääasiassa siitä, että rakenteellinen kestoikä on ylittynyt eli liikennekuormitus on ylittänyt tielle suunnitellun liikennemäärän. Väsymisvauriot voidaan havaita esimerkiksi päällysteen pituussuuntaisena urautumisena tai verkkohalkeamina. (Ehrola 1996, s. 313-315) Palautumattomat muodonmuutokset karkearakeisissa sitomattomissa rakennekerroksissa tai pohjamaassa taas voivat ilmetä esimerkiksi tien urautumisena tai päällysteen epätasaisuutena ja tätä kautta alentaa tien toiminnallista kuntoa (Laaksonen et al. 2004, s. 15; Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 6).

Tierakenteiden suunnittelulla pyritään siihen, että tien pinta säilyttäisi riittävän toiminnallisen kunnon eli riittävän palvelutason käyttäjän kannalta mahdollisimman kustannustehokkaasti. Vaurioiden suuruutta ja laajuutta pyritään rajoittamaan riittäville rakenteille. Käytännössä tien päällysrakenteen tulisi toimia niin, että se pystyy jakamaan siihen kohdistuvat kuormitukset alemmille rakennekerroksille ja pohjamaahan ilman että niiden kestävyys ylittyy ja pysyviä muodonmuutoksia pääsee syntymään (Ehrola 1996, s. 136). Tierakenteiden suunnittelusta ja erityisesti kuormituskestävyyssitoituksesta kerrotaan lisää kappaleessa 3.2.

2.3 Tierakennemateriaalien muodonmuutokset

Kuten kappaleessa 2.2.1 kerrottiin, pyöräkuormitus aiheuttaa jokaisella ylityskerralla tierakenteeseen taipumia. Näistä taipumista syntyy tierakenteeseen jännityksiä, jotka aiheuttavat muutoksia rakenteessa vallitseviin jännitystiloihin ja tätä kautta muodonmuutoksia tierakennemateriaaleihin (Ehrola 1996, s. 135; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 5). Tierakenteessa syntyvien muodonmuutosten suuruus ja luonne määräytyvät liikennekuormitusten synnyttämien jännitysmuutosten sekä tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksien yhteisvaikutuksesta (Ehrola 1996, s. 166). Myös ympäristökuormitukset aiheuttavat jännityksiä ja muodonmuutoksia tierakenteeseen, mutta niiden vaikutusmekanismi on toisenlainen kuin liikennekuormituksen eikä niitä käsitellä tarkemmin tässä työssä.

Sitomattomiin tierakennemateriaaleihin syntyvät muodonmuutokset ovat elastisia eli palautuvia tai plastisia eli palautumattomia. Liikennekuormitus aiheuttaa maamateriaalissa aina sekä elastisen että plastisen muodonmuutoksen. (Ehrola 1996, s. 170; Alkio et al. 2001, s. 18) Palautuvat muodonmuutokset vaikuttavat tierakenteen kykyyn kantaa ja jakaa kuormia. Pysyvät muodonmuutokset taas vaikuttavat tierakenteen pitkäaikaiseen muodonmuutuskäyttäytymiseen ja täten tierakenteen vaurioitumiseen. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 6)

Sitomattomien rakeisten materiaalien muodonmuutuskäyttäytymistä on tutkittu vuosikymmenten ajan, mutta sen takana olevia mekanismeja ei ole täysin kyetty selittämään. Tutkimuksia vaikeuttaa esimerkiksi se, että yhdessä koetilanteessa ei voida varioida kovin montaa tekijää ja se, että tutkimuksia on tehty toisistaan poikkeavilla materiaaleilla ja erilaisilla koejärjestelyillä, jolloin tutkimustulokset eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 14-15) Karkearakeisten tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat monet tekijät, kuten materiaalien tiiviystila, vesipitoisuus sekä materiaalien rakeisuusmuuttujat ja rakeiden fysikaaliset ominaisuudet. Näiden vaikutuksen suuruus materiaalin muodonmuutosominaisuuksiin vaihtelee eikä kaikkien ominaisuuksien vaikutuksista ole vielä tarkkaa tutkimustietoa. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 16) Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 2.5.

Chanin (1990, s. 7-8) esittämän teorian mukaan rakeisten materiaalien muodonmuutokset dynaamisen kuormituksen alla johtuvat kolmesta päämekanismista: materiaalin raerungon tilavuuden muuttumisesta ilman yksittäisten rakeiden muodonmuutoksia eli konsolidaatiosta (*consolidation*), rakeiden kiertymisestä tai liukumisesta toistensa suhteen (*distortion*) ja rakeiden murtumisesta (*attrition*). Kuormitusten aiheuttama elastinen

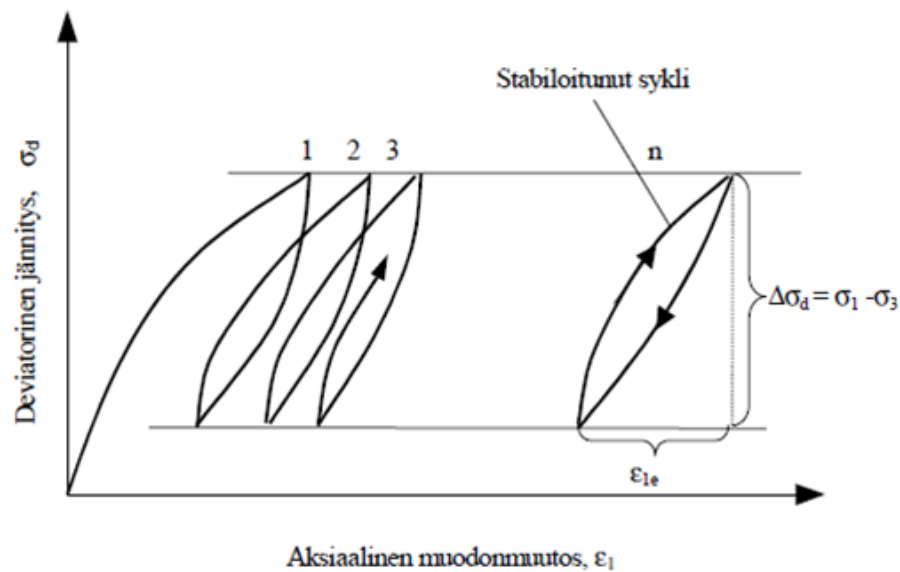
muodonmuutos tierakenteessa johtuu lähinnä rakeiden muodostaman raerungon palautuvasta muodonmuutoksesta ja plastinen osuus rakeiden kiertymisestä ja liukumisesta toistensa suhteen sekä rakeiden murtumisesta (Alkio et al. 2001, s. 16).

Kun karkearakeiseen materiaaliin kohdistuva kuormitus lisääntyy, syntyy yksittäisiin rakeisiin aluksi vain elastisia eli palautuvia muodonmuutoksia. Kuormituksesta johtuvat lisääntyneet jännitykset keskittyvät rakeiden välisiin kontaktipisteisiin. Näihin kohtiin muodostuvat myös suurimmat muodonmuutokset. Jos kuormitukset ovat tarpeeksi suuria, muodostuvat jännitykset kontaktipisteissä niin suuriksi, että rakeet voivat murtua. Tällöin kyseiset rakeet pääsevät liikkumaan toisensa suhteen. Lisäksi kuormitus aiheuttaa rakeiden liukumista kontaktipisteiden kohdalla. Yksittäiset rakeet ja raerunko järjestäytyvät uudelleen, kunnes uusi tasapainotila ulkoisen kuorman alla saavutetaan. Kun tämä ulkoinen kuormitus poistuu, yksittäisten rakeiden ja raerungon elastiset muodonmuutokset palautuvat. Rakeiden liukumisesta ja murtumisesta johtuvat muodonmuutokset ovat kuitenkin pääasiassa palautumattomia. Palautuvien ja palautumattomien muodonmuutosten suhde riippuu pitkälti vaikuttaneiden jännitysten suuruudesta ja erityisesti leikkausjännityksen suuruudesta. (Kolisoja 1997, s. 22-23)

Jos samana pysyvää kuormitusta toistetaan uudelleen eivätkä pääjännitysten suuruudet ja suunnat eivät vaihdu, pysyy karkearakeisten materiaalien muodonmuutosmekanismi pääpiirteittäin samana. Myöhemmissä kuormitusyyskeissä pysyvät muodonmuutokset kuitenkin vähenevät, sillä rakenne on jo järjestäytynyt aiempien kuormitusyyskien aikana uudelleen. Materiaalin käyttäytyminen siis stabiloituu ja kuormituksen alla tapahtuvat muodonmuutokset voidaan olettaa lähes kokonaan palautuviksi. Esimerkiksi laboratoriossa tehtävässä syklisessä kolmiakσιαalikokeessa voidaan saavuttaa tällainen tilanne. Syklisestä kolmiakσιαalikokeesta kerrotaan lisää luvussa 2.6.1. Jos kuormitusolosuhteet muuttuvat ja johtavat aiemmin rakenteeseen aiheutetun jännitystason ylittymiseen, pääjännitysten suuntien vaihtumiseen tai pääjännitysten keskinäisten suhteiden muuttumiseen, rakeet ja raerunko järjestäytyvät uuteen tasapainotilaan. (Kolisoja 1997, s. 22-23)

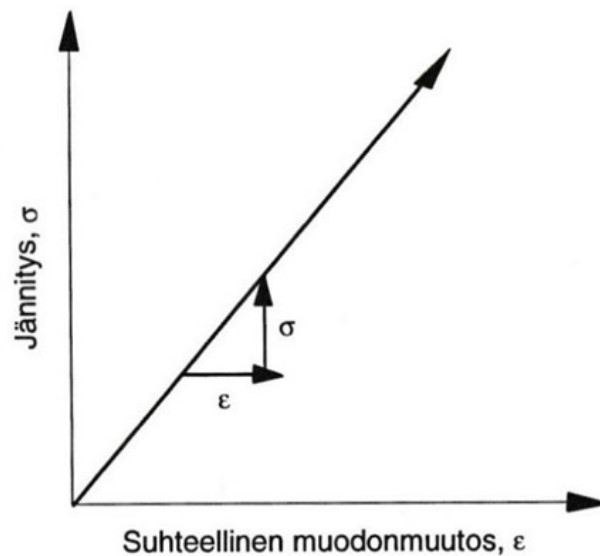
Kun karkearakeista tierakennemateriaalia kuormitetaan toistuvasti samalla kuormalla riittävän monta kertaa ja tierakennemateriaalin muodonmuutoskäyttäytymistä tarkastellaan lyhyellä aikavälillä, pysyvän muodonmuutoksen osuus pienenee lähes merkityksettömäksi ja palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä voidaan tarkastella erillään pysyvästä muodonmuutoskäyttäytymisestä. Kuten kuvasta 7 nähdään, tällöin tierakennemateriaalin jännitys-muodonmuutosyyskli on vakiintunut ja materiaalissa tapahtuvia muodonmuutoksia voidaan tarkastella lähes kokonaan palautuvina. Materiaalin voidaan tällöin

olettaa käyttäytyvän kimmoisasti. Tällaista karkearakeisen maamateriaalin muodonmuutuskäyttäytymistä voidaan kutsua maaelastiseksi muodonmuutuskäyttäytymiseksi. (Ehrola 1996, s. 173; Alkio et al. 2001, s. 18; Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 23)



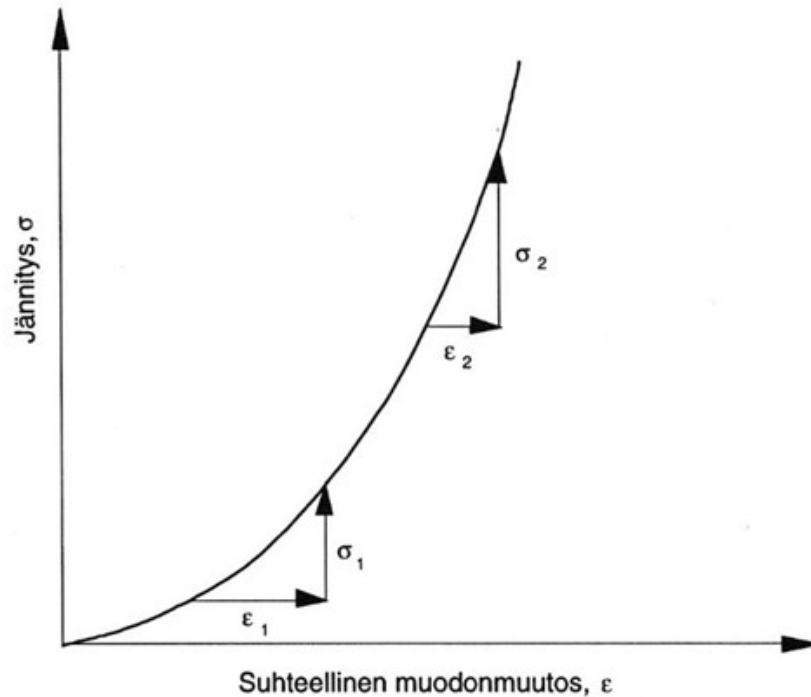
Kuva 7. Sitomattoman materiaalin kuormitus-muodonmuutuskäyttäytyminen samana toistuvan kuormituksen alaisena (Alkio et al. 2001, s. 18).

Materiaali käyttäytyy kimmoisasti, kun kuormituksesta seuraava muodonmuutos tapahtuu välittömästi, pysyy kuormituksen ajan vakiona ja palautuu kokonaan heti kuormituksen poistuttua. Jos materiaali käyttäytyy lineaarisesti kimmoisasti, on jännityksen ja muodonmuutoksen välinen riippuvuus vakio. (Ehrola, s. 167). Lineaarisesti kimmoisan materiaalin muodonmuutuskäyttäytyminen on esitetty kuvassa 8.



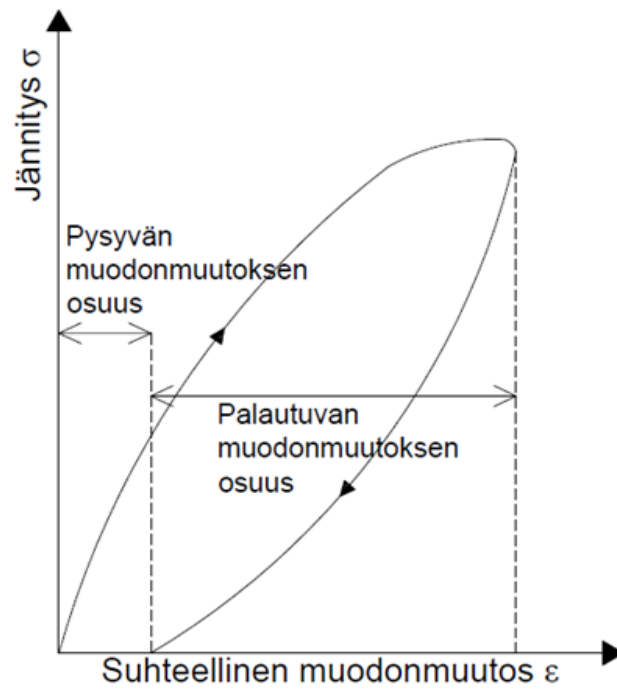
Kuva 8. Lineaarisesti kimmoisan materiaalin käyttäytyminen (Ehrola 1996, s. 167).

Jännityksen ja muodonmuutoksen suhde ei kuitenkaan ole rakeisilla tierakennusmateriaaleilla vakio vaan epälineaarinen (Ehrola, s. 170). Alkio et al. (2001) mukaan tämä johtuu siitä, että tierakenteisiin kohdistuvat kuormat välittyvät tierakennemateriaalien raerungon sisällä rakeilta toisille rakeiden välisten kontaktipisteiden kautta. Näiden kontaktipisteiden ominaisuudet muuttuvat jännitystilän muuttuessa, joten kuormituksen aiheuttama vaste on epälineaarinen kuvan 9 mukaisesti. (Alkio et al. 2001, s. 20)



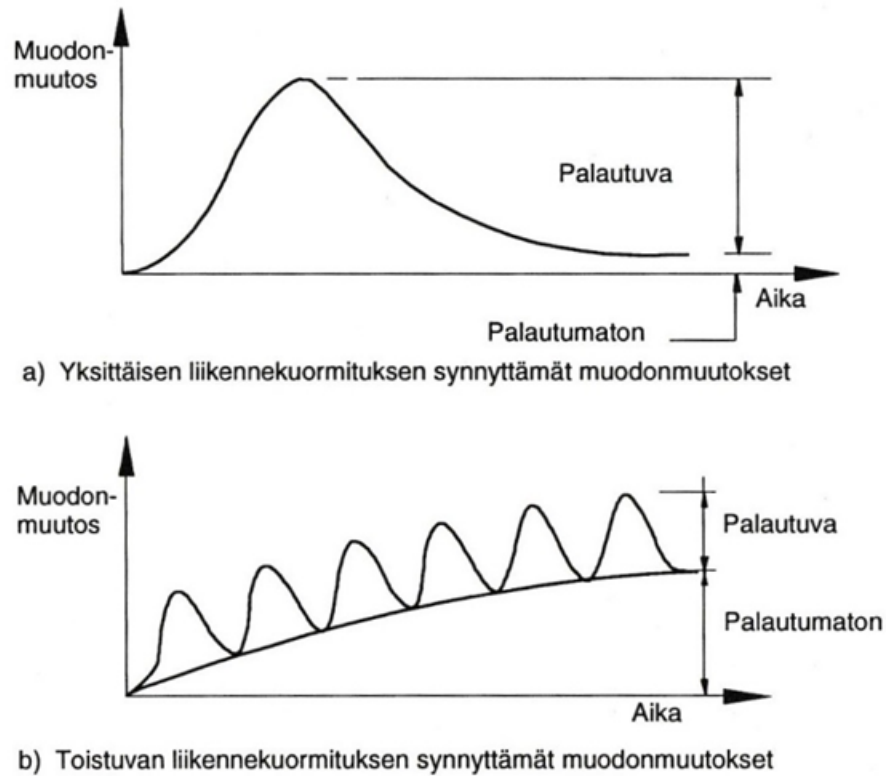
Kuva 9. Epälineaarisesti kimmoisan materiaalin muodonmuutuskäyttäytyminen (Ehrola 1996, s. 171).

Eräs syy jännitys-muodonmuutos -yhteyttä kuvaavan käyrän epälineaariseen muotoon on se, että rakeisessa materiaalissa tapahtuu toistuvan kuormituksen aikana sekä palautuvia että palautumattomia muodonmuutoksia (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 22). Tämä näkyy hyvin kuvasta 10, jossa erottuvat myös yhdellä kuormitusylläällä tapahtuvat palautumattomat eli pysyvät muodonmuutokset. Kuormitusyllän muoto on samanlainen kuin kuvassa 7 ennen kuin kuormitusyllä on stabiloitunut ja karkearakeisen materiaalin voidaan olettaa käyttäytyvän maaelastisesti.



Kuva 10. Karkearakeisen materiaalin yhden kuormitus syklin epälineaarinen muoto (perustuu Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 22).

Kun karkearakeisten tierakennemateriaalien muodonmuutuskäyttäytymistä tarkastellaan pidemmällä aikavälillä, havaitaan palautumattomien muodonmuutosten kumuloituvan kuvan 11 mukaisesti. Sitomattomissa tierakennekerroksissa ja alusrakenteessa tapahtuvien palautumattomien muodonmuutosten kumuloituminen johtaa tierakenteen näkyvään vaurioitumiseen. (Ehrola 1996, s. 170; Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 22)



Kuva 11. Yksittäisen ja toistuvan liikennekuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset (Brown 1993a, Ehrola 1996, s. 171 mukaan).

2.4 Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksien kuvaaminen

Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksia voidaan kuvata erilaisilla muodonmuutosmoduuleilla. Muodonmuutosmoduulilla tarkoitetaan materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen välistä suhdetta. Muodonmuutosmoduuli kuvaa siis materiaalin jäykkyyttä eli esimerkiksi materiaalin kokoonpuristuvuutta tai taipuisuutta. (Alkio et al. 2001, s. 15) Muodonmuutosmoduulien lisäksi kuormitetun materiaalin tilavuuden muutosta kuvaava Poissonin luku on yksi materiaalien muodonmuutosominaisuuksia kuvaavista suureista (Ehrola 1996, s. 180).

2.4.1 Kimmomoduuli E

Kimmomoduulilla (E) tarkoitetaan materiaalin palautuvan muodonmuutoksen ja sen aiheuttaneen jännityksen suhdetta:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

jossa E = kimmomoduuli (kPa), σ = jännitys (kPa) ja ε = suhteellinen muodonmuutos. Tämä yhteys tunnetaan Hooken lakina. (Kolisoja 1993, s. 27) Hooken lain mukaiset riippuvuudet jännitysten ja muodonmuutosten välillä voidaan esittää myös kolmiulotteissa

tilassa (Ehrola 1996, s. 168-170). Kuten kaavasta nähdään, mitä suurempi kimmomoduulin arvo on, sitä pienempiä ovat jännitystason kasvusta johtuvat palautuvat muodonmuutokset.

Kimmomoduuli kuvaa hyvin sellaisten materiaalien muodonmuutuskäyttäytymistä, joilla jännitys-muodonmuutos -vaste voidaan olettaa lineaariseksi (kuva 8). Kuten aiemmassa kappaleessa todettiin, karkearakeisilla tierakennemateriaaleilla jännityksen ja muodonmuutoksen välinen suhde on epälineaarinen (kuva 9), jolloin jännityksen ja siitä seuraavan muodonmuutoksen suhde ei olekaan enää vakio. Kimmomoduulin arvokaan ei ole vakio vaan muuttuu jännitystason muuttuessa. (Kolisoja 1993, s. 27; Ehrola 1996, s. 170-171; Alkio et al. 2001, s. 15-16). Tästä johtuen seuraavassa kappaleessa tarkasteltava jäykkyysmoduuli M_r kuvaa kimmomoduulia paremmin karkearakeisen tierakennemateriaalin jäykkyyttä. Jos kuitenkin kaavan 1 mukaista yksinkertaistettua mallia käytetään tierakennemateriaalien muodonmuutuskäyttäytymistä kuvattaessa, on tärkeää, että käytettävä moduuli määritetään todellista kuormitustilannetta vastaavalle jännitysvälille (Kolisoja 1993, s. 27).

2.4.2 Jäykkyysmoduuli M_r

Jos karkearakeisiin, sitomattomiin tierakennemateriaaleihin kohdistuu toistuvaa liikennekuormitusta, niiden muodonmuutuskäyttäytyminen on kompleksista ja ajasta riippuvaista eikä täysin kimmoisaa. Muodonmuutuskäyttäytymistä voidaan kuitenkin tarkastella lähes kimmoisana tietyn kuormituskertamäärän jälkeen (kuva 7). Sitomattomille karkearakeisille materiaaleille voidaan määrittää toistuvien kuormitusten jälkeen vakiintunutta kimmoista kuormituskäyttäytymistä kuvaava jäykkyysmoduuli M_r . Jäykkyysmoduulista on käytetty myös termejä jäännösmoduuli tai resilient-moduuli. *Resilient* tarkoittaa kimmoisaa, palautuvaa tai joustavaa. (Ehrola 1996, s. 173; Alkio et al. 2001, s. 18; Breccialori & Kolisoja 2006, s. 39) Jäykkyysmoduulin käsite on otettu käyttöön vuonna 1955 kuvaamaan karkearakeisten materiaalien palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä, koska karkearakeisen materiaalin muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttavat monet sellaiset tekijät, jotka eivät normaalisti vaikuta materiaalien kimmoisiin ominaisuuksiin (Kolisoja 1993, s. 28).

Jäykkyysmoduuli voidaan määrittää kuormituspulssin aiheuttaman deviatorisen eli leikkausjännityksen ja muodonmuutoksen palautuvan osan suhteena

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_e}, \quad (2)$$

jossa $\Delta\sigma_d$ = deviatorisen jännityksen vaihteluväli, $\Delta\varepsilon_e$ = palautuva suhteellinen muodonmuutos ja M_r = jäykkyysmoduuli. (Kolisoja 1993, s. 28; Ehrola 1996, s. 174) Jäykkyysmoduulin arvo riippuu kuitenkin sekä materiaaliominaisuuksien ja olosuhdetekijöiden että hydrostaattisesta ja deviatorisesta jännityksestä johtuvan vallitsevan jännitystilän yhteisvaikutuksesta, joten edellä esitetyllä kaavalla laskettu jäykkyysmoduulin arvo kuvaa vain tietyissä olosuhteissa olevan materiaalin muodonmuutuskäyttäytymistä (Alkio et al. 2001, s. 20). Vallitsevan jännitystilän yhteyttä jäykkyysmoduulin arvoon käsitellään luvussa 2.5.1.

Jäykkyysmoduulin arvo voidaan määrittää syklisellä kolmiaksisiaalikokeella, josta kerrotaan enemmän kappaleessa 2.6.1. Sitomattomille kiviaineiksille jäykkyysmoduulin määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 13286-7 (2004) mukaan.

2.4.3 Poissonin luku ν

Yksi materiaalin muodonmuutuskäyttäytymistä kuvaava suure on Poissonin luku. Poissonin luvulla tarkoitetaan kuormituksen suuntaan nähden kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta kuormituksen suuntaiseen muodonmuutokseen eli Poissonin luku kuvaa materiaalin kokoonpuristumiskäyttäytymistä.

Kun kappaletta kuormitetaan x-akselin suuntaisesti, se lyhenee x-akselin suuntaisesti ja sen poikkileikkauspinta-ala kasvaa eli kappaleessa tapahtuu muodonmuutoksia sekä y- että z-akselin suuntaan. Isotrooppiselle materiaalille suhteelliset muodonmuutokset y- ja z-akselin suuntaan ovat yhtä suuria ja niiden suhde x-akselin suuntaiseen muodonmuutokseen on vakio. Tämä suhde eli kuormituksen suuntaan nähden kohtisuoran muodonmuutoksen suhde kuormituksen suuntaiseen muodonmuutokseen on vakio ja sitä kutsutaan Poissonin luvuksi (ν):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}, \quad (3)$$

jossa ε_x = kuormituksen suuntainen muodonmuutos ja ε_y , ε_z = kuormituksen suuntaan nähden kohtisuorat muodonmuutokset. (Ehrola 1996, s. 168-169)

Poissonin luku vaihtelee välillä 0...0,5 materiaalista riippuen. Jos $\nu = 0$, materiaali painuu puristettaessa kokoon leviämättä sivuilla. Esimerkki tällaisesta materiaalista on pesusieni. Jos $\nu = 0,5$, materiaali leviää sivuille kokoonpuristumista vastaavan määrän eli materiaalin tilavuus ei puristettaessa muutu. Nesteet ovat tällaisia materiaaleja. (Ehrola 1996, s. 169) Rakeisilla tierakennemateriaaleilla Poissonin luku vaihtelee normaalisti 0,30-0,35 välillä, mutta sen arvoon vaikuttaa muun muassa vallitseva jännitystila ja erityisesti deviatorisen jännitysmuutoksen ja hydrostaattisen jännitystilakomponentin suhde (Kolisoja 1993, s. 30; Ehrola 1996, s. 178).

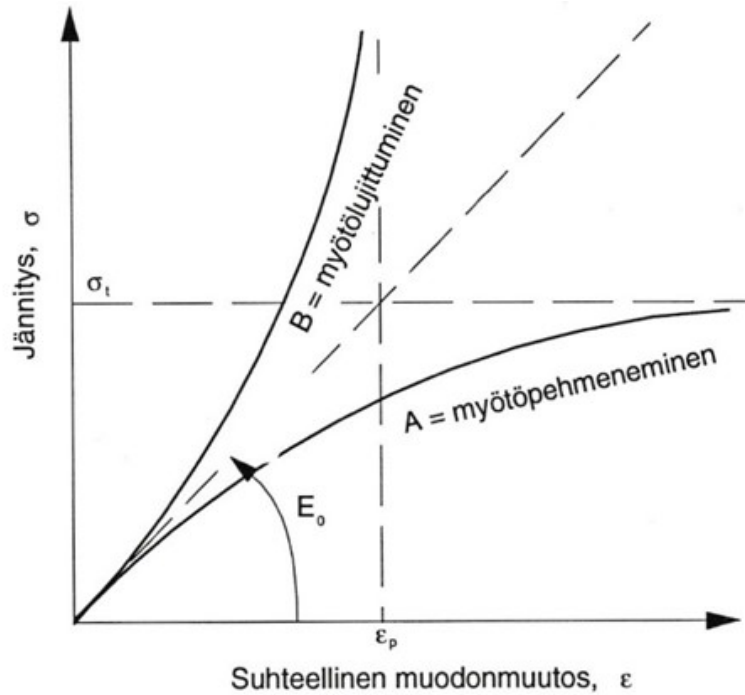
2.5 Muodonmuutosmoduuleihin vaikuttavia tekijöitä

Sitomattomien tierakennemateriaalien palautuvaan muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttavat vallitsevan jännitystilän lisäksi monet materiaaliominaisuudet sekä olosuhdetekijät. Muodonmuutosten kehittymiseen karkearakeisissa sitomattomissa materiaaleissa vaikuttavat esimerkiksi jännityshistoria, pääjännitysten kiertyminen, materiaalin raekokojakauma, hienoainespitoisuus, vesipitoisuus, kyllästysaste, tiiviys, ympäristöolosuhteet ja alla olevan rakenteen muodonmuutosominaisuudet. (Ehrola 1996, s. 180-181; Breccialori & Kolisoja 2006, s. 7) Palautuviin muodonmuutoksiin vaikuttavat erityisesti jännitystaso, tiiviys ja materiaalin vesipitoisuus. Muiden tekijöiden yhteys palautuvien muodonmuutosten kehittymiseen ovat tehtyjen tutkimusten perusteella epäyhteneväisempiä ja osittain jopa ristiriitaisia. Tosin on huomattava, että tutkimuksia on tehty toisistaan poikkeavilla materiaaleilla ja myös toisistaan poikkeavilla koejärjestelyillä. Palautuvia muodonmuutoksia koskevaa tutkimusta on tehty enemmän kuin palautumattomia muodonmuutoksia koskevaa tutkimusta. (Breccialori & Kolisoja 2006, s. 7) Alla on kerrottu lyhyesti palautuviin muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä karkearakeisille luonnonkivimateriaaleille tehtyjen tutkimusten tuloksiin perustuen.

2.5.1 Jäykkyysmoduulin jännitystilariippuvuus

Rakeisilla tierakennusmateriaaleilla jäykkyysmoduulin arvo riippuu sekä rakenteen omasta painosta johtuvasta rakenteesta vallitsevasta jännitystilasta että kuormituksen aiheuttamasta jännityslisäyksestä. Kimmomoduuli tai jäykkyysmoduuli ei siis ole vakio, koska jännityksen ja muodonmuutoksen suhde on epälineaarinen. (Ehrola 1996, s. 170; Alkio et al. 2001, s. 19) Liikennekuormituksen aiheuttamia jännityksiä voidaan simuloida sitomattomissa tierakennemateriaaleissa syklisen kolmiaksaalikokeen avulla (Ehrola 1996, s. 193). Syklisestä kolmiaksaalikokeesta kerrotaan kappaleessa 2.6.1.

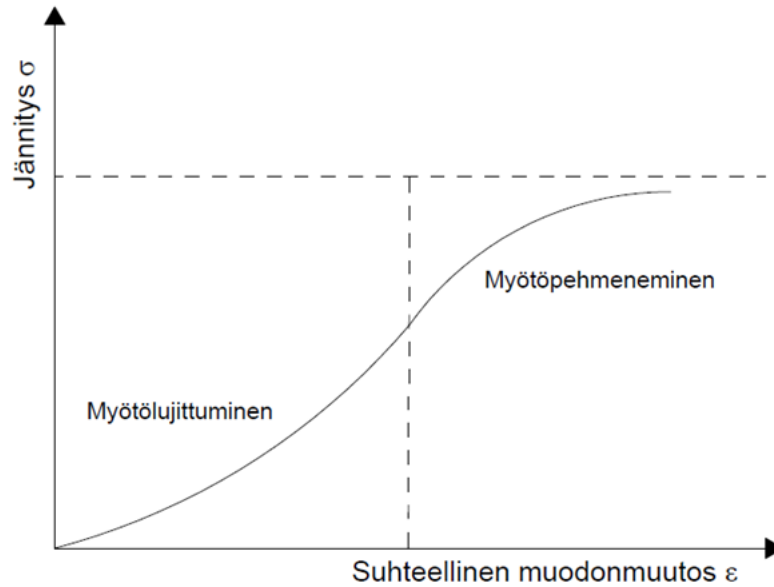
Materiaalit voidaan jakaa jännitystason ja jäykkyysmoduulin välisen riippuvuuden perusteella myötöpehmeneviin ja myötölujittuviin materiaaleihin. (Lay 1993, Ehrola 1996, s. 174 mukaan) Kuten kuvasta 12 nähdään, myötöpehmenevillä materiaaleilla tapahtuu suurempia muodonmuutoksia jännitystason kasvaessa ja myötölujittuvilla materiaaleilla jännitystason kasvaminen vähentää muodonmuutoksia. Kuvassa on kuvattu katkovivalla lineaarisesti käyttäytyvän materiaalin muodonmuutuskäyttäytymistä.



Kuva 12. Muodonmuutoksen ja jännityksen välinen riippuvuus sekä myötöpehmenevillä että -lujittuvilla materiaaleilla (Lay 1993, Ehrola 1996, s. 174 mukaan).

Kun vallitseva leikkausjännitys tarpeeksi pieni eikä maa ole lähellä murtumispistettä, hienorakeiset koheesiomaalajit käyttäytyvät myötöpehmenevän materiaalin tavoin ja karkearakeiset kitkamaalajit myötölujittuvan materiaalin tavoin. Tässä suhteessa eri tavalla käyttäytyvien materiaalien muodonmuutuskäyttäytymisen jännitysriippuvuuden kuvaamiseen on kehitetty erilaiset mallit. (Ehrola 1996, s. 175)

Sitomaton, karkearakeinen materiaali käyttäytyy matalilla jännitystasoilla myötölujittuvasti. Karkearakeisen materiaalin rakeet siirtyvät lähemmäksi toisiaan ja ikään kuin lukittautuvat toisiinsa kiinni. Kun vallitseva jännitystaso lähestyy materiaalin murtumispistettä, muuttuu materiaalin käytös myötöpehmeneväksi, kunnes materiaali saavuttaa murtotilan. (Breccialori & Kolisoja 2006, s. 22) Karkearakeisen materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen välinen suhde on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Sitomattoman, karkearakeisen materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen välinen suhde. (Werkmeister 2003, Breccialori & Kolisoja 2006, s. 22 mukaan)

Jäykkyysmoduulin jännitystilariippuvuutta voidaan kuvata mallilla, jossa jännitystason kuvaamiseen käytetään pääjännitysten summaa

$$M_r = K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2}, \quad (4)$$

jossa M_r = jäykkyysmoduuli (kPa), θ = pääjännitysten summa (kPa), θ_0 = vertailujännitys (1 kPa), K_1 = moduuliluku (kPa) ja K_2 = moduuliekspONENTTI (vakio). Vertailujännitys on kaavassa mukana mittayksiköiden täsmäämiseksi. K_1 ja K_2 ovat materiaalista riippuvia parametreja, jotka ovat sidottuja tiettyyn tiiviys- ja kosteustilaan. ModuuliekspONENTTI K_2 kuvaa jännitysriippuvuuden voimakkuutta. Mitä suurempi materiaalissa vallitseva jännitystaso eli pääjännitysten summa on, sitä suurempi on jäykkyysmoduuli. Tämän mallin ovat esittäneet tekemiensä kuormituskokeiden tulosten perusteella Brown & Pell vuonna 1967. (Brown & Peli 1967, Kolisoja 1993, s. 28-29 mukaan; Ehrola 1996, s. 178; Alkio et al. 2001, s. 20)

Kaavassa 4 oleva pääjännitysten summa voidaan määrittää kaavalla:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (5)$$

jossa σ_1 = aksiaalinen kuormitus (kPa) ja σ_2 ja σ_3 = vaakasuuntainen kuormitus (esimerkiksi kolmiaksaalikokeessa sellipaine) (kPa).

Käytännön tiekuormituksessa esiintyviä jännityksiä voidaan arvioida myös alla olevan kaavan 6 avulla. Pääjännitysten summaan vaikuttavat tällöin sekä liikenteen kuormitus-pulssista johtuvat pääjännitykset että rakenteeseessa esiintyvät geostaattiset jännitykset.

$$\theta = \sigma_1 + \gamma z + \sigma_2 + \sigma_3 + 2K_0\gamma z, \quad (6)$$

jossa θ = pääjännitysten summa (kPa), σ_1 ja σ_2 ja σ_3 = liikennekuormituksen tierakenteseen synnyttämät pääjännityskomponentit (kPa), γ = tarkasteltavan tason yläpuolella olevien tierakennekerrosten keskimääräinen tilavuuspaino (kg/m^3), z = etäisyys tierakenteen pinnalta tarkasteltavalle tasolle (m) ja K_0 = lepopaine kerroin. Karkearakeisille tierakennemateriaaleille lepopaine kerroin vaihtelee 0,4...0,5 välillä. (Brown & Pappin 1985, Ehrola 1996, s. 177-178 mukaan)

Kaavan 4 mukaisessa mallissa jännitystason ja jäännösmoduulin yhteyttä kuvataan pääjännitysten summan avulla eikä siinä erotella hydrostaattisen ja deviatorisen jännitystilan vaikutuksia jäykkyysmoduulin arvoon. (Ehrola 1996, s. 179) Deviatorisen jännitystilan suuruudesta riippuu rakenteessa vallitseva leikkausmuodonmuutostaso ja tällä taas on vaikutusta rakeisten materiaalien muodonmuutosmoduuleihin (Kolisoja 1993, s. 30; Kolisoja 1997, s. 10) Deviatorisen jännityksen vaikutus jäykkyysmoduuliin voidaan huomioida kaavalla:

$$M_r = K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d0}} \right)^{K_3}, \quad (7)$$

jossa M_r = jäykkyysmoduuli (kPa), θ = pääjännitysten summa (kPa), θ_0 = vertailujännitys (1 kPa), σ_d = deviatorinen jännitys (kPa), σ_0 = vertailujännitys (1 kPa), K_1 = moduuliluku (kPa) ja K_2 sekä K_3 = moduuliekspONENTTI (vakio). K_1 , K_2 ja K_3 ovat tiettyyn tiiviys- ja kosteustilaan sidottuja materiaalivakioita. (Uzan et al. 1992, Kolisoja 1993, s. 30 mukaan; Alkio et al. 2001, s. 20)

Kaava 4 on kaavan 7 erikoistapaus, jossa materiaalivakio $K_3 = 0$. Karkearakeisten sitomattomien tierakennemateriaalien yhteydessä käytetään yleisimmin juuri kaavaa 4, jossa materiaalin jännitys-muodonmuutosyhteyttä mallinnetaan pelkästään pääjännitysten avulla. Kyseisellä kaavalla saadaan yleensä riittävä tarkkuus kuormituksen ja palautuvan muodonmuutoksen välisestä yhteydestä, jos Poissonin luvun arvoja valittaessa huomioidaan materiaalin ominaisuudet ja rakenteen tietyssä pisteessä vaikuttava jännitystila. (Kolisoja 1993, s. 30; Ehrola 1996, s. 180)

Liikennekuormitus aiheuttaa tierakenteen eri rakennekerroksiin erisuuruiset pääjännitykset, joten kaavassa oleva pääjännitysten summa riippuu siitä missä kohtaa tutkittava karkearakeinen materiaali tierakenteessa sijaitsee. Juvankosken & Laaksosen (2001)

esittelemien tutkimustulosten mukaiset pääjännitysten summat yksittäispyörä- ja paripyöräkuormituksessa rakennekerroksittain on esitetty taulukossa 1 (Belt 1997, Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 17 mukaan).

Taulukko 1. Liikennekuormituksesta aiheutuvat pääjännitysten summat eri rakennekerroksissa. (Belt 1997, Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 17 mukaan)

Rakennekerros	Yksittäispyöräkuormituksen aiheuttama pääjännitysten summa	Paripyöräkuormituksen aiheuttama pääjännitysten summa
Kantava kerros	62...427 kPa	53...298 kPa
Jakava kerros	37...103 kPa	32...75 kPa
Suodatinkerros	25...50 kPa	24...48 kPa

Ehrolan (1996, s. 219-220) mukaan vallitsevaa jännitystasoa kuvaava pääjännitysten summa vaihtelee kantavassa kerroksessa 50...400 kPa:n välillä tyypillisen arvon ollessa 200 kPa:n suuruusluokkaa. Jakavassa kerroksessa pääjännitysten summa vaihtelee 50...150 kPa:n välillä ollen tyypillisesti 100 kPa. Suodatinkerroksessa jännitystasovaihtelut ovat hyvin pieniä erilaisilla rakennetyypeillä ja tyypillisesti pääjännitysten summana voidaan pitää 50 kPa. Kolisojan (1993, s. 70) mukaan tyypillinen pääjännitysten summa kantavassa kerroksessa vaihtelee 140...280 kPa:n välillä ja jakavassa kerroksessa tyypillinen pääjännitysten summa on noin 70 kPa. Käytännössä rakennekerroksissa vallitseva pääjännitysten summa riippuu päällysteen paksuudesta sekä pyöräpainosta.

2.5.2 Kuormitus- ja jännityshistoria

Karkearakeiseen materiaaliin kohdistuva kuormitus vaikuttaa materiaalin muodonmuutosominaisuuksiin aiemmassa kappaleessa käsitellyn jännitystilan muutoksen kautta. Kuormituksesta johtuvalla jännityshistorialla on tutkimusten mukaan todettu olevan jonkinlaista vaikutusta karkearakeisen materiaalin muodonmuutuskäyttäytymiseen. Toistuvien jännitystilojen alla materiaali voi tiivistyä ja rakeet uudelleen järjestäytyä, mutta tutkimusten mukaan riittävällä määrällä kuormituksia samaa jännitysamplitudia käyttäen voidaan jännityshistorian vaikutukset palautuvaan muodonmuutuskäyttäytymiseen eliminoida. (Breccialori & Kolisoja 2006, s. 43-44) Kolmiaksoalidikokeessa jännityshistorian vaikutus eliminoidaan esikuormittamalla näytettä jännitystasolla, joka on suurempi kuin yksikään varsinaisessa tutkimuksessa käytettävistä jännitystasoista (SFS EN-13286).

Jos materiaaliin vaikuttavat jännitykset ovat niin pieniä, etteivät ne aiheuta huomattavia pysyviä muodonmuutoksia materiaalissa, ei jännityshistorialla ole vaikutusta materiaalin

muodonmuutuskäyttäytymiseen. Lisäksi on tutkittu esimerkiksi kuormitus syklien lukumäärään, kuormituskeston ja kuormitustaajuuden vaikutusta karkearakeisten materiaalien palautuviin muodonmuutosominaisuuksiin, mutta näillä on oletettavasti vain vähäistä merkitystä muiden tekijöiden rinnalla. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 43-45)

2.5.3 Tiiviystila

Kun karkearakeista materiaalia tiivistetään, se pystyy ottamaan paremmin vastaan staattista kuormitusta ilman pysyviä muodonmuutoksia (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 46). Liikennekuormitus ei ole luonteeltaan staattista, mutta tutkimustulosten mukaan tiiviystilalla on merkitystä erityisesti karkearakeisen materiaalin kykyyn vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia (Kolisoja 1993, s. 81). Tiiviystilan merkityksestä karkearakeisen materiaalin kykyyn vastustaa palautuvia muodonmuutoksia taas on osittain jopa ristiriitaisia tutkimustuloksia, mutta yleisesti tarkasteltuna tiiviystilan kasvaessa myös jäykkysmoduulin on havaittu suurenevan (Kolisoja 1997, s. 31; Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 46-47).

Tiiviyeen liittyviä suureita

Tiiviydellä on suuri vaikutus erityisesti karkearakeisten materiaalien ja moreenin lujuus- ja jäykkysominaisuuksiin. Maaperässä tiiviyttä voidaan arvioida suhteellisilla suuruusluokkailmaisuuilla (löyhä, keskitiivis ja tiivis), mutta erityisesti tierakennemateriaalien osalta on tärkeää kyetä kuvaamaan rakennekerroksen tiiviyttä suureilla, joille voidaan määrittää tarkat lukuarvot. Näitä suureita ovat esimerkiksi tilavuuspaino, irtotiheys, huokoisuus, huokosluku, suhteellinen tiiviyys ja tiiviyysaste. (Rantamäki et al. 1997, s. 82)

Kun maata tai rakennekerroksia tiivistetään, maa-erän kokonaistilavuus pienenee, koska tiivistettäessä ilman osuus tästä kokonaistilavuudesta vähenee, vaikka maa-erään vaikuttava kokonaispainovoima pysyy samana. (Rantamäki et al. 1997, s. 82-83) Erityisesti rakennekerrosten tiiviyttä voidaan kuvata tiiviyysasteella, joka määritetään tutkittavan tilan kuivatilavuuspainon ja tiiveimmän tilan kuivatilavuuspainon suhteena tai kuivairtotiheyden ja maksimikuivairtitiheyden suhteena:

$$D(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}}, \quad (8)$$

jossa γ_d = kuivatilavuuspaino tutkittavassa tilassa (kN/m^3), $\gamma_{d,max}$ = kuivatilavuuspaino tiiveimmässä tilassa (kN/m^3), ρ_d = kuivairtitiheys (kg/m^3) ja $\rho_{d,max}$ = maksimikuivairtitiheys (kg/m^3) (Rantamäki et al. 1997, s. 87; Kalliainen et al. 2011, s. 14). Kuivatilavuuspaino tiiveimmässä tilassa määritetään Suomessa parannetun Proctor-kokeen avulla. Proctor-kokeen avulla on myös mahdollista määrittää kyseiselle materiaalille ominainen ns. op-

timivesipitoisuus, jolla voidaan saavuttaa materiaalille suurin mahdollinen kuivatilavuuspaino eli maksimikuivatilavuuspaino. (Rantamäki et al. 1997, s. 88-89) Esimerkiksi hiekan kosteusprosentti luonnontilassa on 5...25 %, optimivesipitoisuus 5...15 % ja maksimikuivairtiheys 1,7...2,2 t/m³ (Hartikainen 2000, s. 83). Parannettu Proctor-koe tehdään standardin SFS-EN 13286-2 (2011) mukaan.

Maan tai tien rakennekerrosten tiivistämisellä tarkoitetaan maa-aineksen huokoisuuden pienentämistä ja tätä kautta irtotiheyden suurentamista erilaisin mekaanisin keinoin. Maarakenteeseen tuodaan energiaa, jolla kumotaan maapartikkelien välisiä voimia. Tällöin partikkelit siirtyvät lähemmäs toisiaan tiiviimpään tilaan. (Hartikainen 2000, s. 81) Tiivistäminen lisää maarakenteen jäykkyyttä ja leikkauslujuutta sekä pienentää materiaalien vedenläpäisevyyttä. (Hartikainen 2000, s. 81) Tiivistämistä voidaan tehdä staattisilla tai dynaamisilla tiivistysmenetelmillä. Staattisilla tiivistysmenetelmillä tiivistysvaikutus saadaan aikaan tiivistyskoneen oman staattisen painon avulla, kun taas dynaamisilla tiivistysmenetelmillä tiivistys tapahtuu staattisen painon lisäksi iskun tai tärytyksen avulla. Tiivistyskalusto ja -menetelmät tulee valita tiivistettävä materiaali ja työmaaolosuhteet huomioiden. Saavutettavat tiivistystulokset riippuvat näiden valintojen onnistumisesta vallitsevissa olosuhteissa. (Hartikainen 2000, s. 81-85)

Tiiviiden vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin

Tiiviiden vaikutusta palautuviin muodonmuutoksiin koskevien tutkimusten tulokset eivät ole olleet täysin yhtenäisiä. Joidenkin tutkimusten mukaan tiiviiden vaikutus on melko merkityksetön tai riippuu pitkälti materiaalista, mutta monet tutkijat ovat sitä mieltä, että jäykkyysmoduuli kasvaa tiiviiden kasvaessa. (Kolisoja 1997, s. 31; Breccialori & Kolisoja 2006, s. 46-47) Esimerkiksi Kolisoja (1997, s. 170) havaitsi tutkimuksissaan jäykkyysmoduulin kasvavan tiiviiden kasvaessa. Mitä tiiviimmin eli lähemmäs toisiaan rakeisen materiaalin rakeet ovat pakkautuneet, sitä enemmän erillisillä rakeilla on kontaktipisteitä keskenään. Jos tällaiseen rakenteeseen kohdistuu kuormituksia, rajoittavat tiiviisti pakkautuneiden rakeiden väliset kontaktivoimat kuormituksesta johtuvia rakeiden liikkeitä ja rakeiden uudelleenjärjestäytymiseen vaaditaan suurempia kuormituksia kuin löyhästi pakkautuneiden rakeiden tapauksessa. Lisäksi kun rakeiden välisiä kontaktipisteitä on enemmän, tietyn ulkopuolisen kuormituksen aiheuttamat keskimääräiset kontaktijännitykset pienenevät. Näin ollen myös muodonmuutokset rakeiden kontaktipisteiden ympäristössä pienenevät ja jäykkyysmoduuli kasvoi.

Tutkimuksissa on myös saatu viitteitä siitä, että tiiviydellä voisi olla vaikutusta Poissonin luvun arvoon (Breccialori & Kolisoja 2006, s. 47). Esimerkiksi Kolisoja (1997, s. 140) havaitsi tutkimuksissaan Poissonin luvun hieman pienenevän tiiviiden kasvaessa.

Tierakenteen tiiviyn kenttämittausmenetelmiä

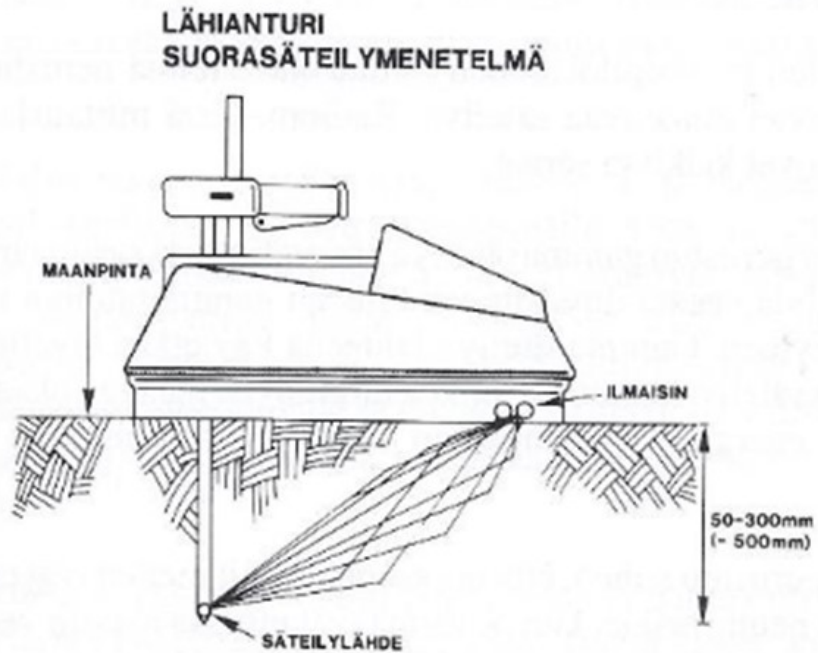
Tierakenteen tiiviyttä voidaan mitata suorilla mittauksilla tai epäsuorasti tie- tai katurakenteen kantavuusmittausten avulla. Näistä kantavuusmittauksista kerrotaan enemmän kappaleessa 2.6.2. Suoria kenttämittausmenetelmiä ovat tilavuuteen perustuvat volymetrimittaukset ja säteilyyn perustuvat tiivysmittaukset. Tierakenteen tiiviyn mittausmenetelmiä käytetään osana tierakenteiden laadunvalvontaa InfraRYL:n mukaisesti (InfraRYL 2018, 21000).

Volymetrikokeessa tiivistettyyn rakennekerrokseen kaivetun kuopan tilavuus mitataan joko hiekalla tai vedellä. Hiekkavolymetrikokeessa käytetään kuopan tilavuuden määrittämiseksi tasarakeista hiekkaa ja vesivolymetrikokeessa vedellä täytettävää pussia. Kuopasta talteen otetun tierakennemateriaalin kuivapaino selvitetään laboratoriossa. Tämä kuivapaino jaetaan kuopan tilavuudella, jolloin saadaan selville mittauskohdan kuivairtotiheys. Tätä kuivairtotiheyttä voidaan verrata parannetulla Proctor-sullonnalla määritettyyn maksimikuivairtotiheyteen tiivysasteen laskemiseksi kaavan 8 mukaan. (Kalliainen et al. 2011, s. 15)

Koska mittauksia varten kaivettava kuoppa on pieni, tulee mittauksista helposti paikallisia vääristymiä. Kuopan syvyys vaihtelee noin 100...150 mm välillä. Erityisesti paksuimmissa rakennekerroksissa saadaan tiiviydet mitattua vain rakennekerroksen pinnasta kuopan mataluuden vuoksi. Jos mittauspisteessä on raekooltaan isompia rakeita enemmän kuin mitattavassa materiaalissa keskimäärin, mittauspisteistä mitatut tiivysasteet ovat suurempia kuin keskimäärin materiaalista olisi mitattavissa. Lisäksi jos rakenteen pintakerros on tiivistymisen jälkeen jäänyt löyhemmäksi, voi se vaikuttaa tuloksiin. (Kalliainen et al. 2011, s. 89, 91)

Rakennekerrosten materiaalin tiivysaste voidaan määrittää myös säteilymittauslaitteella. Säteilymittauslaitteen toiminta perustuu radioaktiivisen säteilyn siroamiseen ja vaimenemiseen maaperässä. Säteilylähde lähettää radioaktiivista säteilyä mitattavan kerroksen läpi laitteessa olevaan vastaanottimeen. Säteilyn voimakkuus on suoraan verrannollinen väliaineen tiheyteen, sillä tiiviimpi maa-aines vaimentaa säteilyä enemmän kuin löyhempi maa-aines. (Kalliainen et al 2011, s. 15) Säteilymittauslaitteella tehdyt mittaukset eivät suoraan mittaa tiiveyteen liittyviä suureita, vaan nämä saadaan rekisteröityä impulssien avulla kokemusperäisistä kalibrointikäyristä (Hartikainen 2000, s. 97). Mittaukset voidaan tehdä pintamittauksena tai suoramittauksena ja esimerkiksi Troxler 3440-säteilymittauslaitteen suoramittauksessa mittaussyvyys on säädettävissä 0-300 mm:n välillä. Troxler-mittariin syötetään materiaalille tyypillinen tai Proctor-sullonnalla

määritetty maksimikuivairtoteiheyys. Mittaustuloksissa esitetään materiaalin märkäirtoteiheyys, vesipitoisuus, märkäirtoteiheyden ja vesipitoisuuden perusteella määritetty kuivairtoteiheyys sekä kuivairtoteiheyden ja maksimikuivairtoteiheyden perusteella laskettu tiiviysaste. (Troxler Model 3440 2009) Periaate kuva säteilymittauslaitteen toiminnasta on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Periaatekuva säteilymittauslaitteen toiminnasta (Hartikainen 2000, s. 98).

Troxlerin etuna on tulosten nopea saatavuus, erityisesti jos mitattavan materiaalin maksimikuivairtoteiheyys on jo valmiiksi tiedossa. Hiekka- ja vesivolymetrimittaukset aiheuttavat katkoja tiivistystyöhön, sillä näytteet on analysoitava laboratoriossa. Troxleria käytettäessä on kuitenkin muistettava, että sillä määritetyt mittaustulokset kertovat vain mitauspisteen tiiviydestä. Jos tiivistyksen etenemistä halutaan seurata, tulisi mittaukset tehdä aina samoista pisteistä. Mittauksia tehdessä on tärkeää, että materiaalin pinta on tasainen ja että mittaussauva on suorassa. (Kalliainen et al. 2011, s. 84-85)

Kalliainen et al. (2011) arvioivat Troxler-laitteen mittaustarkkuutta tekemänsä selvityksen yhteydessä. Troxlerin mittaustarkkuutta arvioivat kokeet tehtiin hiekalle. Havaittiin, että mittaustarkkuuden vaihtelu hyvältäkin pinnalta näyttäisi olevan ± 2 %-yksikköä. Tulos on kuitenkin laitekohtainen, joten sitä ei voida suoraan yleistää kaikkiin laitteisiin. Mahdollinen mittaustarkkuus tulee kuitenkin huomioida, erityisesti kun Troxleria käytetään laadunvalvonnassa. (Kalliainen et al. 2011, s. 143-144)

Troxlerin käyttö uusiomateriaaleista tehtyjen rakennekerrosten laadunvalvonnassa on asia, jota tulisi tutkia lisää. Koska säteilymittauslaitteella tehdyt mittaukset perustuvat kokemuseräisiin kalibrointikäyriin, eivät välttämättä luonnonkiviaineksille määritetyt kalibrointikäyrät toimi uusiomateriaaleilla. Lisäksi vesipitoisuusmittaustuloksiin voivat vaikuttaa materiaalissa olevat aineet. Runsaasti vetyä sisältävät materiaalit aiheuttavat liian suuria vesipitoisuustuloksia. Tällaisia aineita voivat olla lentotuhka, kalsiumsulfaattidihydraattia tai kivihiiltä sisältävät materiaalit. Booria, klooria tai kadmiumia sisältävät materiaalit absorboivat neutroneja ja aiheuttavat liian pieniä vesipitoisuuksia. Mittausten yhteydessä on mahdollista käyttää mittauslaitteeseen syötettäviä kosteuskorjauskertoimia, jotka on määritetty laboratoriossa. (Troxler Model 3440 2009)

Sormusen (2017) jätteenpolton lentotuhkia koskevassa väitöskirjatutkimuksessa havaittiin, että säteilymittauksiin perustuvat tiivysmittaukset eivät soveltuneet kyseiselle uusiomateriaalille (Sormunen 2017, liite 4, s. 116). On tärkeää käyttää materiaaleille sopiviksi todettuja laadunvalvontamenetelmiä. Lisätutkimuksia tarvitaan myös sen selvittämiseksi, ovatko luonnonkivimateriaaleille määritetyt laadunvalvonnan perusteena olevat tiivysastevaatimukset sopivia uusiomateriaaleille.

2.5.4 Rakeisuusjakautuma

Maamateriaalin raekoostumus kertoo paljon materiaalin käyttäytymisestä. Niinpä raekoostumuksen kuvaamisessa käytetään rakeisuuskäyrää, joka ilmaisee, kuinka suuri suhteellinen osuus on tiettyä raekokoa pienempiä rakeita. Rakeisuuskäyrän sijainti ja muoto kuvaavat mm. kiviaineksen karkeutta ja lajittuneisuutta. (Rantamäki et al. 1997, s. 55-56)

Raekokojakautuman muotoa voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^n, \quad (9)$$

jossa P = läpäisyprosentti, d = raekoko, D_{\max} = maksimiraekoko ja n = rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametri. Rakeisuus vaikuttaa paljon materiaalin tiivistymiseen. Jos $n = 0,5$ on rakeisuuskäyrän muoto paraabeli eli ns. Fullerin käyrä. Tällaisen rakeisuuskäyrän muodon omaavalla materiaalilla voidaan saavuttaa suurin mahdollinen teoreettinen tiivys pienimmällä mahdollisella työmäärällä. Jos $n < 0,5$ materiaalit tiivistyvät helposti ja jos $n > 0,5$ materiaalit tiivistyvät vaikeammin. Kun materiaalin rakeisuus noudattaa Fullerin käyrää, pienemmät rakeet täyttävät suurempien välissä olevan tyhjätilan. (Ehrola 1996, s. 181; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 26)

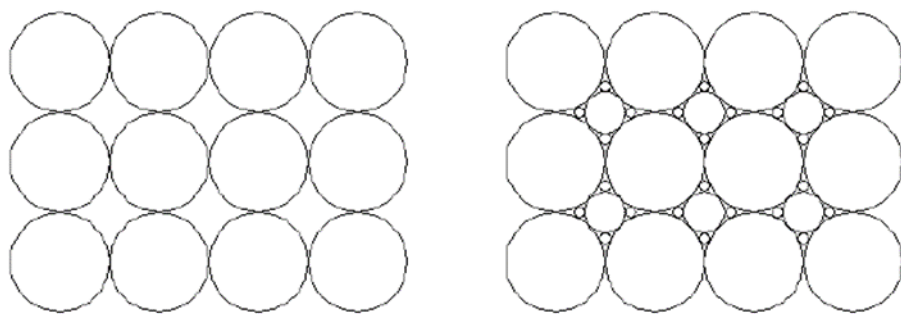
Breccialorin & Kolisojan (2006) kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltujen tutkimusten tulosten perusteella karkearakeisella materiaalilla raekokojakauma ja maksimiraekoko vaikuttavat rakeiden välisten kontaktipisteiden määrään ja sitä kautta materiaalin jäykkyyteen eli kykyyn vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. Toisaalta raekokojakauman muoto vaikuttaa myös materiaalin vesipitoisuuteen ja tiivistettävyyteen, joilla on myös vaikutusta materiaalin muodonmuutuskäyttäytymiseen. (Breccialori & Kolisoja 2006, s. 49, 51-52)

Raekokosuhde kuvaa materiaalin seka- tai tasarakeisuutta. Raekokosuhde määritetään kaavalla

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (10)$$

jossa d_{60} = materiaalin rakeisuuskäyrän läpäisyprosentin 60 kohdalta määritetty raekoko ja d_{10} = materiaalin rakeisuuskäyrältä läpäisyprosentin 10 kohdalta määritetty raekoko. Materiaalia sanotaan tasarakeiseksi, jos $C_u \leq 5$ ja sekarakeiseksi, jos $5 < C_u \leq 15$. Jos $C_u > 15$, niin materiaali on suhteistunut. (Rantamäki et al. 2009, s. 56; Kalliainen et al. 2011, s. 20)

Lajittumattomat eli sekarakeiset materiaalit tiivistyvät tyypillisesti paremmin kuin lajittuneet eli tasarakeiset materiaalit. Tasarakeisissa materiaaleissa ei ole tarpeeksi hienoaainesta täyttämään suurempien rakeiden välistä tyhjättilaa, joten materiaalin tiiviysaste jää pienemmäksi kuin sekarakeisissa materiaaleissa. (Hartikainen 2000, s. 83) Jos sekarakeisessa materiaalissa on hienoaainemateriaalia kohtuullisen vähän, mahtuu se hyvin karkeampien rakeiden välisiin tyhjättiloihin ja materiaalin karkeammat rakeet voivat edelleen olla suorassa kosketuksessa toistensa kanssa. Näin kuormitukset voivat välittyä karkeampien rakeiden muodostaman raerungon kautta. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 27; Breccialori & Kolisoja 2006, s. 54) Kuvassa 15 näkyvät esimerkit tasarakeisesta ja sekarakeisesta materiaalista.



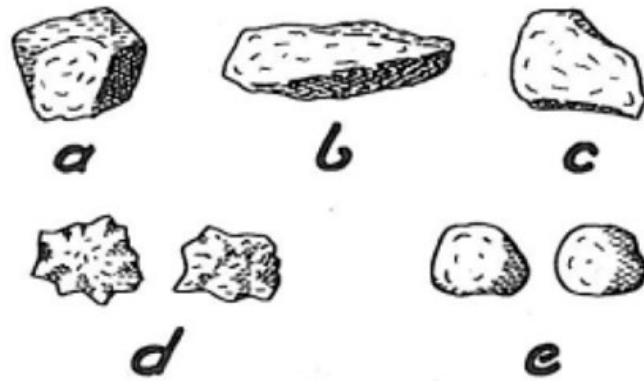
Kuva 15. Vasemmalla tasarakeinen materiaali ja oikealla sekarakeinen materiaali (Kalliainen et al. 2011, s. 20).

Jos materiaalissa on liikaa hienoaainesta, karkeammat rakeet menettävät kosketuksen toisiinsa. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 27; Breccialori & Kolisoja 2006, s. 54) Eri-tyisesti savilajitepitoisuuden eli raekooltaan alle 0,002 mm:n kokoisten rakeiden määrän kasvu pienentää jäykkyysmoduulin arvoa. Merkitystä on myös savilajitteen mineralogisella koostumuksella. (Kallio 1990, Ehrola 1996, s. 181 mukaan).

Maksimiraekoon vaikutusta palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen on ollut haastavaa tutkia laboratoriolaitteista johtuvien rajoitusten vuoksi (Kolisoja 1993, s. 72). Kuitenkin esimerkiksi Nottinghamissa tehtyjen tutkimusten perusteella maksimiraekoon pienentäminen alensi myös palautuvaa muodonmuutosmoduulia (Sweere 1990, s. 47). Suomalaisissa tutkimuksissa havaittiin maksimiraekoon kasvattamisen 20 mm:stä 55 mm:in suurentavan levykuormituskokeen perusteella lasketun E-moduulin arvon jopa nelinkertaiseksi. Syklisellä kolmiakssiaalikokeella tehdyissä tutkimuksissa näytteiden rakeisuuksien väliset erot olivat liian vähäisiä, jotta selkeää riippuvuutta maksimiraekoon kasvattamisen ja jäykkyysmoduulin suurenemisen välille olisi saatu esille. (Kolisoja 1993, s. 72-73)

2.5.5 Rakeiden pinnan karkeus ja muoto

Raemuodon ja rakeiden pinnan karkeuden merkitystä materiaalin muodonmuutoskäyttäytymiseen ei ole juurikaan tutkittu, mutta raemuodolla ja rakeiden pinnan karkeudella on kuitenkin vaikutusta materiaalin tiivistettävyyteen (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 35). Materiaalin muodonmuutoskäyttäytymisen kannalta raemuodolla onkin eniten merkitystä erityisesti pysyvien muodonmuutosten kannalta, sillä erimuotoisten rakeiden tiivistettävyyssominaisuudet poikkeavat toisistaan (Kolisoja 1993, s. 82). Esimerkiksi huonon muotoarvon omaavat litteät ja suikulan muotoiset rakeet eivät tiivisty yhtä hyvin kuin karkeat ja pyöreämmät rakeet (Laitinen 1990, s. 36). Kuvassa 16 on esitetty tyyppiesimerkkejä erimuotoisista rakeista.



Kuva 16. Esimerkkejä erimuotoisista rakeista: a) kuutiomainen rae, b) neulamainen rae, c) litteä rae, d) teräväsärmäisiä rakeita ja e) pyöreäsärmäisiä rakeita (Kalliainen et al. 2011, s. 22).

Rakeiden pinnan karkeudella voi olla jonkin verran merkitystä myös materiaalin palautuvaa muodonmuutosta kuvaavaan jäykkyysmoduuliin. Jos rakeiden pinta on karkea, on myös rakeiden välinen kitka suurempi ja tämän takia rakeiden kokoonpuristuminen vaatii enemmän työtä. (Laitinen 1990, s. 36; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 35) Kuitenkin palautuvien muodonmuutosten kannalta rakeiden pinnan näkyvää karkeutta tärkeämpää on rakeiden pintakitka. Suuremman pintakitkakulman ja suuremman materiaalin palautuvaa muodonmuutosta kuvaavan moduulin välillä on havaittu olevan ainakin jonkinlainen riippuvuus. Pintakitkan suuruuteen vaikuttaa materiaalissa olevien mineraalien kide-rakenteesta johtuva pinnan mikrokarkeus, joka vaikuttaa rakeiden välisissä kontaktipisteissä esiintyvään kitkaan. (Kolisoja 1993, s. 83)

2.5.6 Tierakennemateriaalin mineraloginen koostumus ja laatu

Tierakennemateriaalin mineraloginen koostumus yhdistettynä rakeiden laatuun ja rae-kokojakaumaan vaikuttaa monella tavalla karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin. Suurin merkitys kiviaineksen lujuudella ja kulutuskestävyydellä on kuitenkin palautumattomien muodonmuutosten synnyssä. (Kolisoja 1993, s. 84; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 35)

2.5.7 Vesipitoisuus

Materiaalin vesipitoisuuden vaikutus karkearakeisten materiaalien palautuviin muodonmuutosominaisuuksiin on havaittu sekä laboratoriossa että in situ-mittauksissa. Tutkimustulosten perusteella vesipitoisuus vaikuttaa kuitenkin enemmän palautumattomien muodonmuutosten syntyyn. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 58) Vaikutuksen suunta ja

suuruus riippuvat sekä materiaalista että kosteuden määrästä. Materiaalin hienoainespitoisuudella on myös merkitystä. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 28; Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 58)

Vesipitoisuuden kasvu kasvattaa jäykkyysmoduulin arvoa vain osittain kyllästyneillä, suhteistuneilla materiaaleilla. Osittain veden kyllästämissä huokosissa pintajännitys eli näennäinen koheesio painaa maarakeita toisiaan vasten ja näin nostaa jäykkyysmoduulin arvoa. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 28) Pääsääntöisesti vesipitoisuuden lisääntyminen kuitenkin pienentää maa-ainesten jäykkyysmoduulin arvoa (Ehrola 1996, s. 181).

2.5.8 Muut olosuhdetekijät

Sitomattoman, sulana olevan tierakennemateriaalin jäykkyysmoduuli ei ole lämpötilariippuvainen. Maamateriaalin jäätyminen kuitenkin kasvattaa vettä sisältävän materiaalin jäykkyysmoduulia. (Ehrola 1996, s. 128; Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 19) Jäätyneen maa-aineksen jäykkyysmoduulin arvo riippuu voimakkaasti kuormitusnopeudesta, kun taas sulan sitomattoman karkearakeisen maa-aineksen kohdalla kuormitusnopeudella ei ole suurta merkitystä jäykkyysmoduulin arvoon (Ehrola 1996, s. 128; Alkio et al. 2001, s. 15). Routimis-sulamisprosessi pienentää routivan maakerroksen jäykkyysmoduulia merkittävästi. Etenkin ensimmäisen routimis-sulamiskierron aikana jäykkyysmoduuli pienenee noin puoleen alkuperäisestä, seuraavien kiertojen vaikutus jäykkyysmoduuliin on paljon vähäisempi. Jäykkyysmoduuli pienentyy siksi, että maakerros on routaan sulaessa löyhemmässä tilassa kuin ennen routimista. (Thompson 1990, Ehrola 1996, s. 182 mukaan)

2.5.9 Alla olevan kerroksen muodonmuutosominaisuudet

Tien sitomattomien rakennekerrosten muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttavat myös tarkasteltavan rakennekerroksen alla olevien rakennekerrosten tai alusrakenteen muodonmuutosominaisuudet. Mikäli alapuolisen rakennekerroksen jäykkyysmoduuli on huomattavasti pienempi kuin päällä olevan rakennekerroksen, tulisi kimmoteorian mukaisesti ylemmän sitomattoman rakennekerroksen alapintaan syntyä vetoa. Sitomaton materiaali ei kuitenkaan kestä vetoa, joten yläpuolisella rakennekerroksella voi käytännössä olla vain tietynsuuruinen jäykkyysmoduuli, joka on tietyssä suhteessa alemman kerroksen jäykkyysmoduuliin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että päällimmäisen kerroksen jäykkyys voi olla korkeintaan 2-4 -kertainen alemman kerroksen jäykkyyteen verrattuna. (Kolisoja 1993, s. 8; Ehrola 1996, s. 182-183)

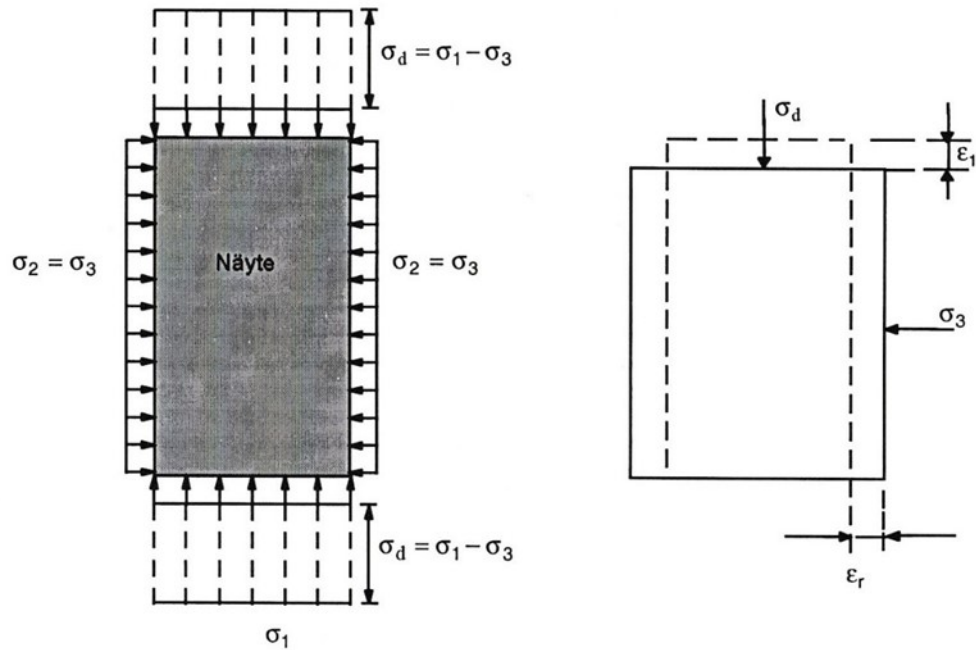
2.6 Tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksien määrittäminen

Karkearakeisten sitomattomien tierakennemateriaalien muodonmuutosominaisuuksia voidaan määrittää sekä laboratoriokokeilla että kenttäkokeilla. Osalla näistä tutkimuksista, kuten syklisellä kolmiaksaalikokeella, voidaan mitata suoraan materiaalin muodonmuutosparametrien arvoja. Osa tutkimuksista on epäsuoria mittaamenetelmiä, joilla mitataan muodonmuutosominaisuuksiin yhteydessä olevia tunnuslukuja ja näiden tunnuslukujen avulla arvioidaan varsinaisten muodonmuutosparametrien arvot. (Ehrola 1996, s. 189)

2.6.1 Laboratoriokokeet

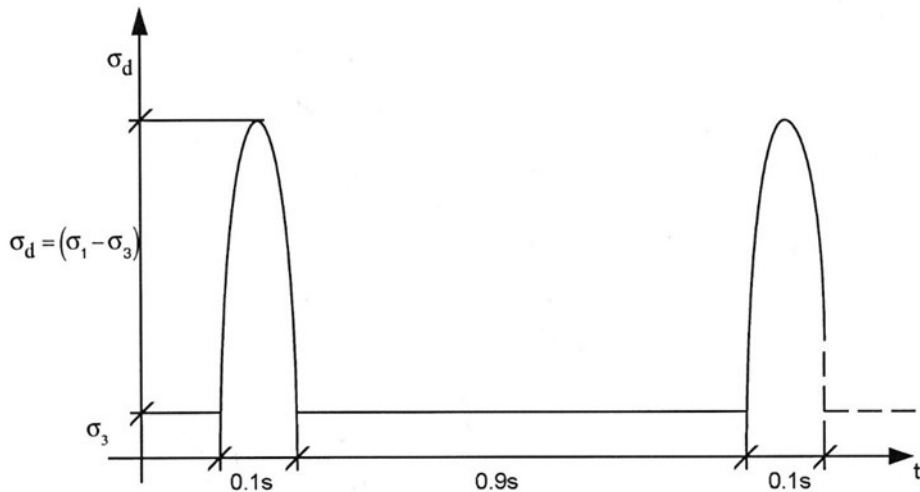
Eräs yleisimmin käytetyistä laboratoriokokeista rakeisen materiaalin jäykkyysmoduulin määrittämiseksi on syklinen kolmiaksaalikoe, jossa materiaalia kuormitetaan syklisesti liikennekuormitusta simuloiden (Ehrola 1996, s. 193). Sitomattomille kiviaineksille syklinen kolmiaksaalikoe tehdään standardin SFS-EN 13286-7 mukaan.

Syklisessä kolmiaksaalikokeessa materiaalin rakeisiin kohdistuu jännitys kolmesta eri pääsuunnasta. Koekappaleeseen kohdistetaan pulssimaista kuormitusta, jossa deviatorista jännitystä vuoroin lisätään ja poistetaan. (Sweere 1990, s. 46) Pääjännitysten erotus ($\sigma_1 - \sigma_3$) on se aksiaalinen jännityspulssi, joka koekappaleeseen kohdistuu. Tämä jännityspulssi synnyttää kappaleeseen aksiaalisen (ϵ_1) ja radiaalisen (ϵ_r) muodonmuutoksen. (Ehrola 1996, s. 194) Syklisessä kolmiaksaalikokeessa materiaalikappaleeseen kohdistuva jännitystila ja sen synnyttämät muodonmuutokset on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Sitomattomaan rakennekerrokseen kohdistuvat jännitykset syklisen kolmiaksaalikokeen aikana. (Kolisoja 1993, s. 95; Ehrola 1996, s. 195)

Koekappaleeseen kohdistuva kuormitus tapahtuu siis syklisesti. Kuormituspulssien välissä on lyhyt palautumisaika, jonka aikana mahdollinen viivästynyt kimmoinen muodonmuutos ehtii palautua kuormituspulssien välillä (Brown 1976, Ehrola 1996, s. 195 mukaan). Palautuvan muodonmuutuskäyttäytymisen määrittämisessä käytettävän kuormitustavan periaate on esitetty kuvassa 18. Vakiosellipainekokeessa koekappaleeseen vaikuttava vaakajännitys eli sellipaine on vakio koko kokeen ajan, kun taas muuttuvaselipainekokeessa sellipaine muuttuu aksiaalisen kuormituksen muuttuessa (Alkio et al. 2001, s. 19).



Kuva 18. Syklisen kuormitustavan periaate (Kolisoja 1993, Ehrola 1996, s. 195 mukaan).

Kun koekappaleeseen kohdistuva syklinen kuormitus on toistettu tarpeeksi monta kertaa, voidaan materiaalin olettaa käyttäytyvän jokseenkin kimmoisasti eli toistokuormituksen aiheuttama jännitys-muodonmuutossykli on vakiintunut kuvan 7 mukaisesti. Tyypillisesti 100 kuormitus sykliä on riittävä määrä. Tällöin jäykkyysmoduuli voidaan määrittää jännitys-muodonmuutoskuvaajan sekanttimoduulina kaavan 2 mukaisesti deviatorisen jännityksen ja aksiaalisen muodonmuutoksen suhteenä. (Ehrola 1996, s. 196) Kaavassa 4 olevat parametrit K_1 ja K_2 määritetään syklisestä kolmiaksaalikokeesta saatujen jäykkyysmoduulien perusteella ja tämän jälkeen voidaan kaavaa 4 käyttää jäykkyysmoduulin arviointiin kyseiselle materiaalille.

Tien rakennemateriaaleihin kohdistuu erisuuruisia jännityksiä riippuen materiaalin sijainnista tierakenteessa, joten koekappaleeseen vaikuttavaa jännitystasoa varioimalla voidaan tarkastella materiaalille ominaista jäykkyysmoduulia juuri käyttökohteelle sopivalla jännitystasolla (Ehrola 1996, s. 196). Koska karkearakeisten materiaalien jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen on epälineaarista, on tärkeää käyttää eri sellipaineen ja deviatorisen jännityksen yhdistelmiä materiaalin muodonmuutoskäyttäytymisen selvittämiseksi (Lätti 2015, s. 42).

Kolmiaksaalikoe voidaan suorittaa myös täysin staattisena kokeena, jolloin materiaali-kappaleeseen kohdistuvaa jännitystä nostetaan tasaisesti ja hitaasti. Staattista kolmiaksaalikoea käytetään lähinnä materiaalin lujuusominaisuuksien, kuten leikkauskestävyyskulman ja koheesion, selvittämiseen. (Sweere 1990, Lätti 2015, s. 39, 42 mukaan)

2.6.2 In situ-mittaukset

Tien sitomattomien rakennekerroksien muodonmuutosominaisuuksia voidaan tutkia erilaisilla kantavuutta eli tierakenteen kokonaisjäykkyyttä mittaavilla menetelmillä. Kantavuuden ja kuormituskestävyyden käsitteistä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.1. Kantavuuden lukuarvo kuvaa tierakenteen kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia, joten kantavuutta voidaan kutsua myös tierakenteen moduuliksi. Suomessa kenttäkokeina tehdään sekä staattisia levykuormituskokeita että dynaamisia pudotuspainolaitteita. Nämä eivät mittaa suoraan rakennekerrosten muodonmuutosmoduuleja vaan muodonmuutosmoduulien arvot määritetään koko rakenteen mitatusta muodonmuutosvasteesta. (Kolisoja 1993, s. 1; Alkio et al. 2001, s. 16) Kantavuusmittauksia käytetään osana rakentamisen laadunvalvontaa (InfraRYL 2018, 21000).

Levykuormituskoe

Pohjoismaissa levykuormituskoea käytetään laajasti tie- ja maarakenteiden muodonmuutos- ja tiivysominaisuuksien määrittämiseen. Levykuormituskokeen kuormitus vaikuttaa pääasiassa noin metrin syvyyteen saakka rakennekerroksista riippuen, tätä syvemmällä olevissa materiaali-kerroksissa tapahtuu kuormituksen alla vain vähän kokoonpuristumista. (Kalliainen et al. 2011, s. 27-28)

Levykuormituskokeessa halkaisijaltaan 300 mm jäykkää ympyränmuotoista levyä kuormitetaan staattisella voimalla ja voiman kasvaessa mitataan rakenteen painumaa levyn kehällä olevien mittakellojen tai levyn keskellä olevan mittakellon avulla. Staattisen voiman vastapaino saadaan esimerkiksi kuorma-autosta, johon levykuormituskokeen varustus on kytketty. Kuormitus nostetaan portaittain 10 kN kerrallaan maksimikuormaan 60 kN asti. Mittakellojen lukemat kirjataan jokaisen kuormitusportaan kohdalla ylös. Levykuormituskoe voi keskeytyä, jos rakenne levyn alla painuu yli 10 mm ennen kuin maksimikuormaan asti päästään. Maksimikuormituksen jälkeen kuormitus tehdään samasta kohdasta toisen kerran. Toisen kuormituksen aiheuttamien rakenteen muodonmuutosten oletetaan olevan lähes kokonaan palautuvia, vaikka todellisuudessa mukana on toisellakin kuormituskerralla myös jonkin verran pysyviä muodonmuutoksia. Ensimmäiseltä kuormituskerralta laskettua muodonmuutosmoduulia merkitään E_1 :ksi ja toiselta kuormituskerralta laskettua muodonmuutosmoduulia E_2 :ksi. Muodonmuutosmoduuli E_2 kuvaa koko tierakenteen ja alusrakenteen jäykkyyttä eli rakenteen kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. (Ehrola 1996, s. 202-204; Kalliainen et al. 2011, s. 27) Levykuormituskokeen toteutus on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Kuva levykuormituskokeen suorittamisesta.

Muodonmuutosmoduuli E :n arvo määritetään Boussinesq'n ympyränmuotoisen kuormitetun levyn keskipisteen painuman laskentakaavan avulla:

$$s = r(1 - \nu^2) \frac{pa}{E}, \quad (11)$$

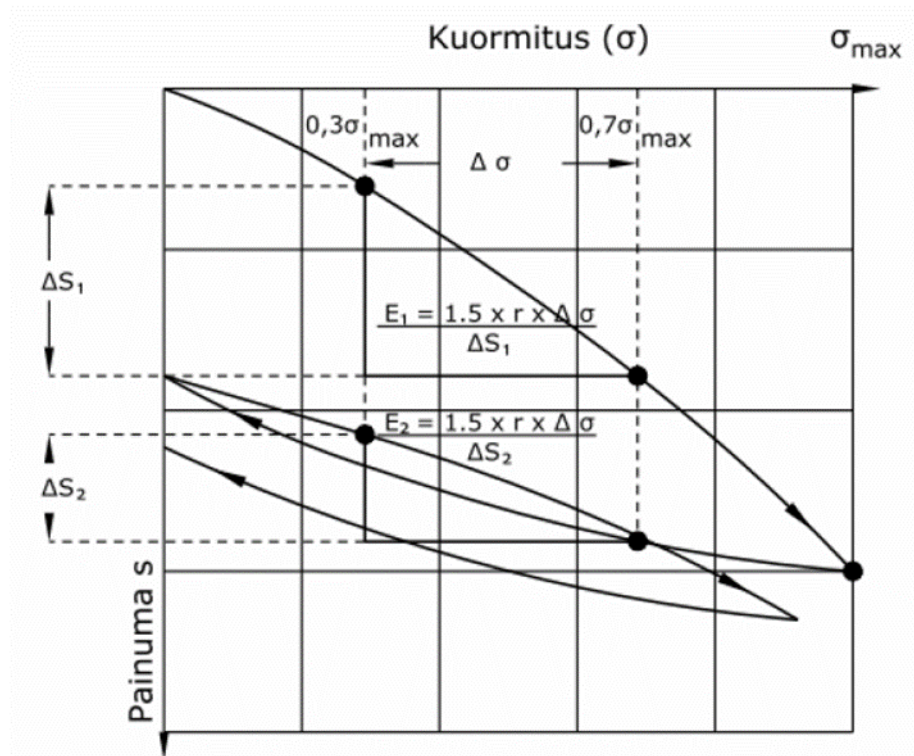
jossa s = painuma (mm), r = kerroin, jonka arvo on $\pi/2$, jos levy oletetaan jäykäksi ja 2, jos levy oletetaan taipuisaksi, ν = Poissonin luku, p = kosketuspaine (kN/m^2), a = kuormituslevyn säde (m) ja E = kimmomodulaali (MPa). Tästä kaavasta saadaan ratkaistua levykuormituskokeen muodonmuutosmoduuli kaavalla:

$$E = r(1 - \nu^2) \frac{pa}{s} = k \frac{pa}{s}, \quad (12)$$

jossa kertoimen k arvo riippuu kuormituslevyn jäykkyydestä ja kuormitetun materiaalin Poissonin luvusta. Se voi vaihdella 1,2...1,8 välillä. Käytännön mittauksissa k :lle käytetään arvoa 1,5. (Ehrola 1996, s. 204; Kalliainen et al. 2011, s. 27)

Muodonmuutosmoduulit määritetään kuormitus-muodonmuutosriippuvuuden perusteella. Muodonmuutosmoduulin määrittäminen voi tapahtua joko riippuvuuden lineaarisen

osan mukaan tai suurimman kuormituksen ja painuman perusteella suoraan alkutilanteesta lopputilanteeseen. (Ehrola 1996, s. 203) InfraRYL:n ohjeistuksen mukaan muodonmuutosmoduuli määritetään 30...70% kuormituksen väliltä kuvan 20 mukaisesti. Tällöin karsitaan pois kuormitustapahtuman alkuvaiheessa tapahtuneet häiriöt sekä mahdollisuus siihen, että loppukuormituksen aikana rakenteen kimmoisuus saattaisi ylittyä. (Piippo et al. 1990, Kalliainen et al. 2011, s. 30 mukaan; InfraRYL 2018, 21000, liite 2)



Kuva 20. InfraRYL:n mukainen muodonmuutosmoduulin määrittäminen (InfraRYL 2018, 21000, liite 2).

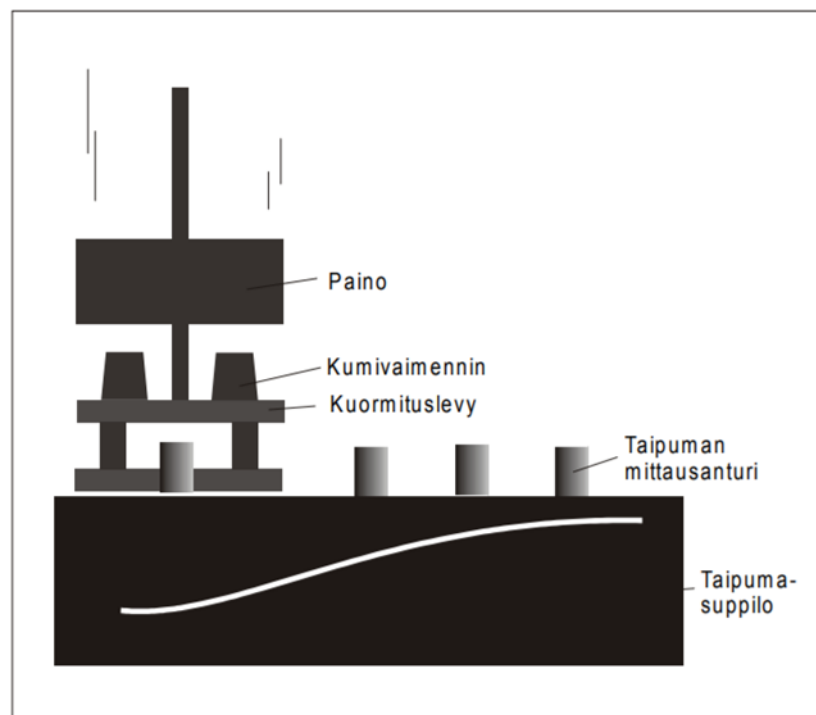
Levykuormituskokeen tierakenteeseen aiheuttama staattinen kuormitus vastaa melko huonosti liikenteen aiheuttamaa kuormitusta. Lisäksi vaikka kuormitus toistetaan kaksi kertaa, on rakenteesta mitatuissa painumissa mukana aina jonkin verran myös palautumattomia muodonmuutoksia. Levykuormituskoe on kuitenkin käytetty mittaustelmänä kauan, joten siihen liittyy paljon kokemukseräistä tietoa mittaustulosten ja tierakenteen käyttäytymisen syy-yhteydestä. (Ehrola 1996, s. 204) Lisäksi levykuormituskokeen tulokset vastaavat kuormituksen suuruudesta johtuen tierakennemateriaalien muodonmuutuskäyttäytymistä suuruusluokaltaan oikealla jännitystasolla (Kolisoja 1993, Ehrola 1996, s. 204 mukaan).

Laitteiston ollessa kunnossa on mittaustarkkuus keskimäärin $\pm 5 \dots 10$ MPa. Mittaustuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että esimerkiksi yksittäinen suurempi kivi voi vaikut-

taa huomattavasti mittaustulokseen. Näin ollen tutkittavan osuuden kantavuuden ja tiiviyden arvioinnissa tulisi käyttää keskiarvoja ja keskihajontaa. (Kalliainen et al. 20011, s. 28)

Pudotuspainolaitemittaus

Tierakenteen käyttäytymistä kuorma-auton aiheuttaman liikennekuormituksen alaisena simuloidaan pudotuspainolaitteella (PPL) (Spoof & Petäjä 2000b, s. 4). Pudotuspainolaitemittauksessa mitataan palautuvaa painumaa (taipumaa) rakenteen pinnalta. Mittausvälineinä ovat geofonit tai kiihtyvyyssanturit. Suomessa on käytössä KUAB-merkkisiä pudotuspainolaitteita, joilla voidaan mitata taipumaa kuormituskeskipisteen lisäksi useista pisteistä kuormituslevyn sivulta. Tyypillisesti nämä mittauspisteet sijaitsevat 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm:n etäisyydellä kuormituslevyn keskipisteestä. Rakenteen taipumaa voidaan mitata myös Heavy Loadman-pudotuspainolaitteella, jolla mitataan rakenteen pinnan taipumaa ainoastaan levyn keskipisteen kohdalta. (Kalliainen et al. 2011, s. 28) Tässä työssä käsitellään vain sellaisia pudotuspainolaitteita, jotka mittaavat taipumia useista pisteistä. Useista pisteistä mitattujen taipumien avulla saadaan muodostettua tierakenteelle taipumasuppilo. Kuvassa 21 näkyy pudotuspainolaitteen toimintaperiaate.



Kuva 21. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate (Spoof & Petäjä 2000, s. 4).

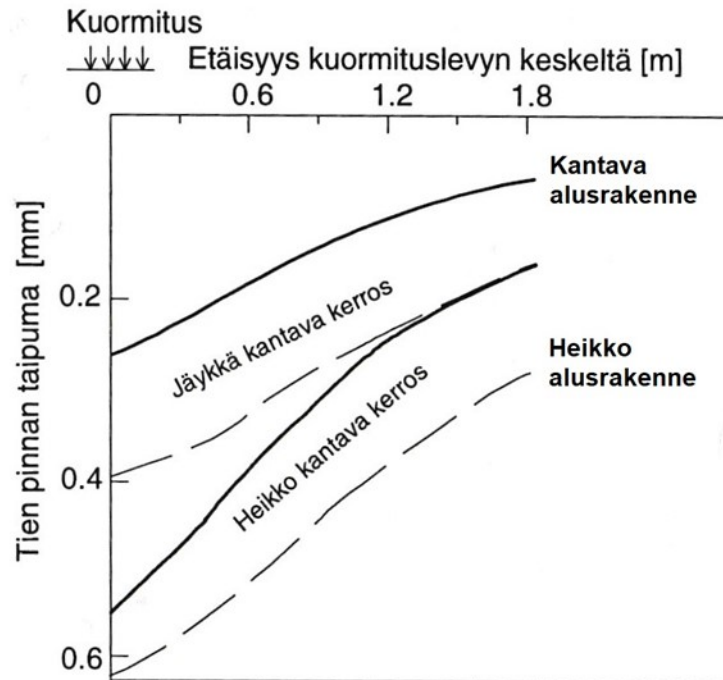
Pudotuspainolaitemittauksessa pudotetaan painoa halkaisijaltaan 300 mm:n suuruiselle pyöreälle levylle. Levyn ja pudotettavan painon välissä on kumivaimennin. Yleensä käytetty paino vastaa levyn alla kuorma-auton 10 tonnin akselipainoa ja suurinta pyöräkuormaa vastaava käytetty voima on 50 kN. Kuormitus aika on noin 20-60 ms. (Spoof & Petäjä 2000b, s. 4) Jos kuormitusimpulssin kesto on noin 20-30 ms, vastaa se hyvin 70-80 km/h tunnissa liikkuvan kuorma-auton renkaan kuormitus aikaa (Ehrola 1996, s. 206). Boussinesq'n teorian mukaan pudotuspainolaitteen aiheuttama kuormitus vaikuttaa tierakenteessa noin 1,5 kertaa kuormituslevyn halkaisijan syvyydelle (Kalliainen et al. 2011, s. 29). Painoa pudotetaan samaan kohtaan kaksi kertaa ja jälkimmäisen mittauksen taipumat valitaan jatkokäsittelyyn taipumasuppilon tarkastelua tai tierakenteen E_2 -moduulin laskemista varten. Ensimmäisen mittauksen taipumista voidaan määrittää tierakenteelle E_1 -moduuli. Kaavalla 13 saadaan laskettua rakenteen E-moduuli suoraan kuormituslevyn alta:

$$E_0 = \left[\frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_0} \right], \quad (13)$$

jossa a = kuormituslevyn säde (m), σ = kosketuspaine (MPa), d_0 = taipuma kuormituslevyn alla (mm) ja ν = Poissonin luku (Spoof & Petäjä 2000b, s. 13-14).

Pudotuspainolaitemittauksen taipumatuloksista voidaan määrittää myös tierakenteen taipumasuppilot. Taipumasuppilo kuvaa tien pintaan kohdistuvasta voimasta aiheutuvia tien pinnan taipumia sekä suoraan kuormituslevyn alla että useammilla etäisyyksillä kuormituslevystä. Rakennekerrosten moduulit voidaan laskea suoraan mitatuista taipumista, mutta taipumasuppiloiden tarkastelua ja niistä laskettavia parametreja varten pudotuspainolaitteella mitatut taipumat tulee normalisoida kuormituksen suhteen. Lisäksi jos pudotuspainolaitemittaukset mitataan sidotun rakennekerroksen päältä, tulee taipumat normalisoida myös päällysteen lämpötilan suhteen. (Spoof & Petäjä 2000b, s. 4, 11-12)

Taipumasuppilon muodon avulla voidaan arvioida tien rakennekerrosten ja pohjamaan muodonmuutosominaisuuksia. Tien pinnan taipuma etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä kuvaa rakenteen taipumaa vastaavasta syvyydestä alaspäin. Suppilon muoto kuormituslevyn läheisyydessä kuvaa siis päällysrakenteen yläosan muodonmuutosominaisuuksia ja kauempana kuormituslevystä alusrakenteen muodonmuutosominaisuuksia. (Spoof & Petäjä 2000b, s. 4, 13; Ehrola 1996, s. 206) Kuvassa 22 on esitetty esimerkki kuva alus- ja tierakenteen muodonmuutosominaisuuksien ja pudotuspainolaitteella mitattujen taipumasuppiloiden muodon välisestä yhteydestä.



Kuva 22. Esimerkkikuva suppilon muodosta (Brown 1993c, Ehrola 1996, s. 207 mukaan)

Mitattujen taipumasuppiloiden avulla voidaan määrittää takaisinlaskennalla tien erillisten rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit (Spoof & Petäjä 2000a, s. 4; Spoof & Petäjä 2000b s. 4; Ehrola 1996, s. 206-207). Pudotuspainolaitetta käytetäänkin myös rakenteen parantamiskohteissa vanhan rakenteen nykytilan arvioimiseksi (Spoof & Petäjä 2000b, s. 4).

Taipumasuppiloista voidaan laskea erilaisia parametreja, joilla voidaan kuvata tien rakennekerrosten jäykkyyttä tai kuntoa (Spoof & Petäjä 2000b, s. 11-12). Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty yhteenveto näistä parametreista.

Taulukko 2. Taipumasuppilosta laskettavia parametreja (Spoof & Petäjä 2000b, s. 12).

Nimi	Merkintä	Yksikkö	Käyttötarkoitus
Keskitaipuma	d_0	μm	Kuvaa koko rakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä
Taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä	d_r	μm	Kuvaa ekvivalenttisyvyydellä r olevan kerroksen jäykkyyttä
SCI (Surface Curvature Index)	$d_0 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
BCI (Base Curvature Index)	$d_{n-1} - d_n$	μm	Kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
BDI (Base Damage Index)	$d_1 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen kuntoa

d_0 = taipuma kuormituslevyn alla
 d_r = taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä
 d_n = taipuma mitattuna kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla
 d_{n-1} = taipuma mitattuna toiseksi kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla
 d_1 = taipuma mitattuna lähimpänä kuormituslevyä olevalla anturilla

EU:n rahoittamassa Roadex-projektissa on esitetty suositeltaviin raja-arvoihin perustuva jaottelu tierakenteen kuntoa kuvaaville taipumasuppiloista määritettyjen parametrien arvoille. Päällystetyille teille soveltuva jaottelu on esitetty taulukossa 3 ja heikoille päällystetyille teille ja sorateille soveltuva jaottelu taulukossa 4. Tämä luokittelu antaa viitteitä siitä, johtuvatko päällysrakenteen mahdolliset urautumisongelmat pikemminkin päällysrakenteen yläosan kunnosta (SCI-arvo) vai heikosta pohjamaasta (BCI-arvo) (Roadex 2019).

Taulukko 3. SCI- ja BCI-arvoihin perustuva jaottelu päällystetyille teille (Roadex 2019).

Luokka	SCI (μm), 0-200 mm	BCI (μm), 900-1200 mm
Hyvä	< 120	< 10
Riittävä	120 – 200	10 – 30
Puutteellinen	200 – 250	30 – 40
Heikko	250 – 400	40 – 60
Erittäin heikko	> 400	> 60

Taulukko 4. SCI- ja BCI-arvoihin perustuva luokittelu heikosti päällystetyille teille ja sorateille (Roadex 2019).

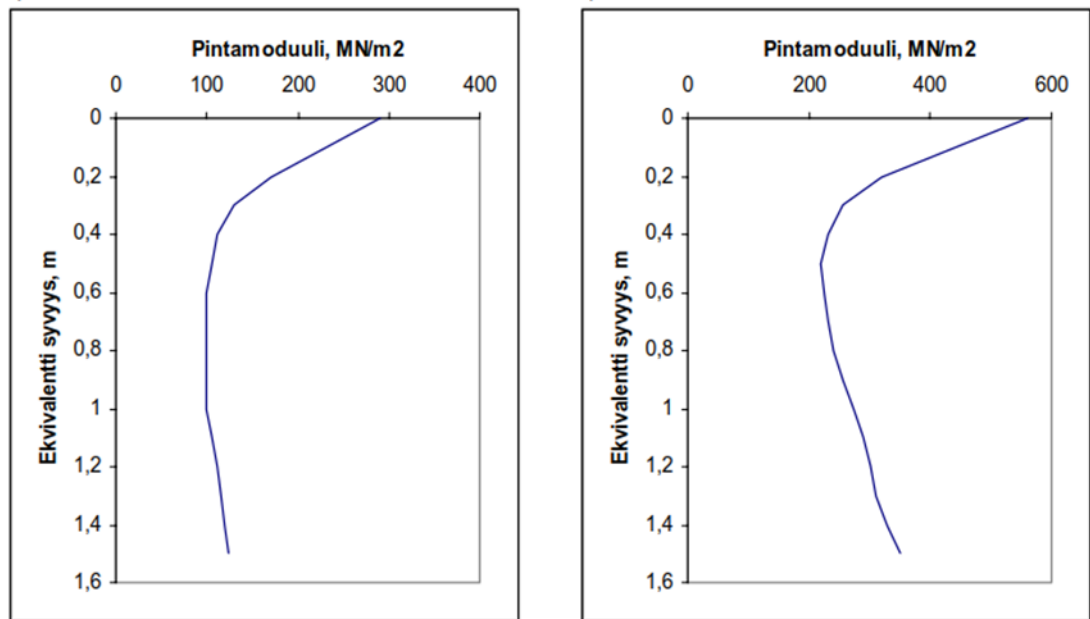
Luokka	SCI (µm), 0-200 mm	BCI (µm), 900-1200 mm
Hyvä	< 180	< 10
Riittävä	180 – 250	10 – 30
Puutteellinen	250 – 300	30 – 60
Heikko	300 – 600	60 – 120
Erittäin heikko	> 600	> 120

Pudotuspainolaitteen mittaustuloksista voidaan määrittää myös pintamoduulikuvaajia, joiden perusteella voidaan arvioida eri rakennekerrosten jäykkyyttä pintamoduulin E_r avulla. Pintamoduuli kuvaa rakenteen muodonmuutosmoduulia anturin etäisyyttä vastaavalta syvyydeltä alaspäin. Kuormituslevyn alla tapahtuvasta taipumasta määritettyä pintamoduuliarvoa kutsutaan myös koko tierakenteen jäykkyyttä kuvaavaksi kantavuusarvoksi (kaava 13). Muut pintamoduulit eri taipuma-anturin etäisyyksillä kuormituslevystä lasketaan kaavalla:

$$E_r = \left[\frac{(1-\nu^2)\sigma_0 a^2}{r d_r} \right], \quad (14)$$

jossa a = kuormituslevyn säde (m), σ_0 = kosketuspaine (MPa), d_r = taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä (m), r = taipuma-anturin etäisyys kuormituslevystä (m) ja ν = Poissonin luku (Spoof & Petäjä 2000b, s. 13-14).

Kuvassa 23 on esitetty kahden eri tierakenteen pintamoduulikuvaajat. Vasemman puoleisessa kuvassa pintamoduuli pienenee noin 400 mm syvyyteen asti ja pysyy siitä alkaen likimain vakiona. Pohjamaan jäykkyys on noin 150 MPa. Oikean puoleisessa kuvassa pohjamaan jäykkyys on suurempi kuin päällysrakenteen alaosan jäykkyys. (Spoof & Petäjä 2000b, s. 13-14)



Kuva 23. Esimerkit kahden eri tierakenteen pintamoduulikuvaajista (Spoof & Petäjä 2000b, s. 14).

Kalliaisen et al. (2011) mukaan sitomattomien materiaalien pinnalta ei välttämättä saada kaikilta osin luotettavia mittauksia vaan pintamoduulien arvo voi vaihdella kerroksissa melko paljon (Kalliainen et al. 2011, s. 118). Pintamoduuleja on käytetty esimerkiksi päällystettyjen tierakenteiden materiaalien E-moduulien määrittämiseen osana opinnäytteitä (Hölttä 2012; Harju 2017).

3. TIERAKENTEN KUORMITUSKESTÄVYYS

Tierakenteen suunnittelulla pyritään siihen, että tie säilyttäisi riittävän palvelutason koko suunnitellun käyttöajan. Tällöin tierakenteen tulee kestää sille kohdistuvia liikenne- ja ympäristökuormituksia ilman, että tiehen muodostuu käyttäjille hankalia tai liikenneturvallisuutta uhkaavia vaurioita. Tierakenteen kuormitus-, routa- ja painumakestävyys vaikuttavat rakenteen tasaisuuteen, vaurioitumiseen ja urautumiseen. Väyläviraston Tierakenteen suunnittelu -ohjeen mukaan ”kuormituskestävyyssuunnittelun tavoitteena on estää raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu ja pysyvät muodonmuutokset tien rakennekerroksissa ja pohjamaassa” (Liikennevirasto 2018, s. 33).

3.1 Kuormituskestävyyden käsite

Kuormituskestävyydellä tarkoitetaan tierakenteen kykyä kestää toistuvia liikennekuormituksia. Tierakenteeseen kohdistuu toki myös ympäristörasituksia, jotka osaltaan vaikuttavat tierakenteen kestävyyskykyyn. Kantavuus-käsite ja kuormituskestävyys-käsite ovat usein arkikielessä sekoittuneet keskenään, joten tässä kappaleessa avataan molempia käsitteitä.

Kantavuus-käsite on siirtynyt tienrakennustekniikan sanastoon soratiekaudella, jolloin erityisesti keväisin roudan sulamisen aikoihin oli kyse siitä, sortuuko tie kuorman alla vai kantaako tie ylimenevän kuorman sortumatta (Siika 2006, s. 12). Kantavuus-käsite liittyy siis läheisesti geoteknisen kantavuuden määrittelyyn: geotekninen kantavuus tarkoittaa varmuutta maapohjan murtumista vastaan. Tämä kantavuus voidaan määrittää esimerkiksi liukupinta-analyysillä tai kantavuuskaavoilla. Toisaalta geotekniseen kantavuuteen yhdistetään myös se, että painumien ja painumaerojen tulee pysyä sallituissa rajoissa. (Rantamäki et al. 2009, s. 173, 175) Maarakenteiden osalta kantavuus määräytyy pääosin maan leikkauslujuuden perusteella:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi', \quad (15)$$

jossa τ_f = leikkauslujuus, c' = tehokas koheesio, φ' = tehokas leikkauskestävyysskulma ja σ' = tehokas leikkauspinnassa vaikuttava normaalijännitys. Maa murtuu, jos maahan kohdistuva leikkausjännitys ylittää maan leikkauslujuuden. (Ehrola 1996, s. 122; Rantamäki et al. 2009, s. 122-123)

Kantavuus-käsitteen käyttö tie- ja katurakentamisen yhteydessä on ongelmallista siksi, että etenkin arkikielessä hyvän kantavuuden voidaan ajatella tarkoittavan hyvää tie- tai katurakenteen kuormituskestävyyttä. Koska erityisesti tierakenteen palautumattomat

muodonmuutokset aiheuttavat tiessä näkyvät vauriot, oletetaan hyvän kantavuuden tarkoittavan tie- ja katurakenteen kykyä vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia.

Kantavuus on siis koko tierakenteen muodonmuutosmoduuli, joka kuvaa koko rakenteen kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. Kantavuus määritetään rakenteen pintaan kohdistuvan kuormituksen ja tästä aiheutuvan taipuman suhteena esimerkiksi levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitemittauksella. Jos tierakenteet ovat ohuet, myös pohjamaan ominaisuudet vaikuttavat tierakenteen pinnalta mitattuun lukuarvoon. Kantavuuden lukuarvon eli tierakenteen muodonmuutosmoduulin laskeminen perustuu Bousinesq'n esittämän ympyränmuotoisen kuormitetun levyn keskipisteen painuman laskentamalliin. (Kalliainen et al. 2011, s. 26) Laskentamalli on esitetty levykuormituskokeiden yhteydessä kappaleessa 2.6.2.

Luonnonmateriaalien palautuvaan ja palautumattomaan muodonmuutuskäyttäytymiseen muodonmuutoksia vaikuttavat suurelta osin samat tekijät. Tierakenteen kyky vastustaa toistuvasta kuormituksesta johtuvien pysyvien muodonmuutosten syntymistä riippuu erityisesti tierakenteessa käytettyjen materiaalien leikkauslujuudesta. Materiaalin tiiviyden kasvaessa myös materiaalin leikkauslujuus kasvaa, aivan kuten karkearakeisen materiaalin jäykkyysmoduulikin. Tierakenteen jäykkyyttä eli kantavuuden lukuarvoa on siis käytännössä mahdollista käyttää rakenteen kuormituskestävyyden arvioinnissa. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 7; Kalliainen et al. 2011, s. 19, 26) Kantavuusmittauksen tulos eli rakenteen E-moduuli ei kuitenkaan kuvaa suoraan rakenteen tiiviyyttä. Materiaalin jäykkyys kasvaa tiiviysasteen kasvaessa, mutta riippuvuus on materiaali-kohtainen. Kantavuuden lukuarvojen rajoja määritettäessä onkin tehty oletuksia sekä rakennekerrospaksuuksista että rakennekerrosmateriaaleista. Kantavuus ei myöskään kuvaa tiiviyksen laatua, vaikka kantavuuteen perustuvia laatuvaatimuksia onkin olemassa (Kalliainen et al. 2011, s. 26, 31).

On tärkeää ymmärtää, että tierakenteen päältä mitattu kantavuusarvo E ei kuvaa tietyn rakennekerroksen tai materiaalin ominaisuuksia. Kantavuusarvo on tierakenteen pinnalta mitattu kuormitusvaste, joka kuvaa mittaustason alapuolisten rakenteiden kokonaisjäykkyyttä eli koko rakenteen kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. Tierakenteen materiaalien muodonmuutosmoduulit, E-moduulit tai jäykkyysmoduulit, kuvaavat materiaalien kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. Yksi kantavuus-käsitteen käyttöön liittyvistä haasteista on se, että materiaalien suurella jäykkyydellä ja koko rakenteen suurella jäykkyydellä oletetaan saatavan kuormituskestävyydeltään hyviä rakenteita. Asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen ja sitä tarkastellaan enemmän kappaleessa 3.4.

3.2 Kuormituskestävyysmitoitus

Kappaleessa 3.2.1 kerrotaan lyhyesti eri menetelmistä, joilla päällysrakenteiden kuormituskestävyysmitoitusta voidaan tehdä. Kappaleissa 3.2.2 ja 3.2.3 esitellään tiivistetysti Suomessa käytössä olevan tie- ja katurakenneohjeistuksen mukaisen kuormituskestävyysmitoituksen kulku. Lopuksi arvioidaan Suomessa käytettävän kuormituskestävyysmitoituksen toimivuutta.

3.2.1 Yleisesti kuormituskestävyysmitoituksesta

Tierakenteen ja tierakennemateriaalien toiminnan kannalta on oleellista, että minkälaisia muodonmuutoksia liikennekuormitus saa rakenteessa aikaan ja miten tierakenne ja materiaalit näitä muodonmuutoksia kestävät. Alusrakenteen tehtävänä on muodostaa riittävän tasalaatuinen ja kantava sekä painumaton alusta päällysrakenteelle. Päällysrakenne taas ottaa vastaan liikenteen kuormitukset ja jakaa ne tasaisesti alusrakenteelle huomioiden alusrakenteen muodonmuutosominaisuudet. (Ehrola 1996, s. 13, 166) Osa päällysrakenteen suunnittelua on päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoitus, joka voidaan tehdä joko kokemusperäiseen (empiiriseen), analyyttiseen (mekanistiseen) tai kokeellis-analyyttiseen (mekanistis-empiiriseen) malliin perustuen (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 4).

Suurin osa maailmalla rakennetuista teistä on mitoitettu kokemusperäisesti ja käytetyt tierakennetyypit ovat olleet sellaisia, joiden on todettu kestävän niihin kohdistuvia kuormituksia edes kohtuullisesti (Kolisoja 1993, s. 15). Kokemuksen kautta on saatu tietoa miten tietyt rakennemateriaalit ja rakennetyypit käyttäytyvät kuormituksen alla ja tätä tietoa voidaan hyödyntää rakenteiden mitoituksessa (Ehrola 1996, s. 166). Empiiriset mallit ovat myös pitkällä aikavälillä tarkasteltuna olleet itseään tarkentavia (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 5). Tällaisen mallin hyödyntämisessä on kuitenkin heikkoutensa, sillä rakenneratkaisujen toiminnasta on oltava riittävästi kokemusta ja tämä hidastaa esimerkiksi uusien rakenneratkaisujen käyttöönottoa.

Analyttisessä mallissa rakennemitoitus tehdään analyyttisen teorian mukaan laskettujen jännitysten ja muodonmuutosten avulla. Analyttisessä mitoitustarkastelussa tien sitomattomien kerrosten karkearakeisten materiaalien kykyä vastustaa palautuvia muodonmuutoksia on mahdollista tarkastella juuri kuormitusolosuhteita vastaavassa tilassa. Tarkastelussa ovat erityisesti rakenteen kriittiset rasitukset ja näihin liittyvät rakenteen kestävyysmallit. Analyttisellä mallilla on mahdollista käsitellä mitä tahansa materiaalia ja rakennetyyppejä, kunhan vain tiedetään tai pystytään selvittämään analyyttisen mallin

vaatimat lähtöparametrit. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 5) Tämän mallin hyödyntämisen haasteena onkin juuri lähtöparametrien selvittäminen luotettavasti ja taloudellisesti kohtuullisessa ajassa.

Kokeellis-analyttisessä mallissa yhdistetään teoreettinen malli kentällä havaittuun vaurioitumiseen (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 5). Suomessa käytössä oleva mitoitusmenettely on kokeellis-analyttinen. Se perustuu Odemarkin monikerrosrakenteen laskentamenettelyyn, mutta rakennekerroksissa käytettävien materiaalien E-moduulit arvioidaan epäsuorasti kokemusperäiseen tietoon pohjautuen (Kolisoja 1993, s. 17)

3.2.2 Tierakenteen kuormituskestävyysmitoitus Suomessa

Kuormituskestävyysmitoitus on yksi osa tie- ja katurakenteiden päällysrakenteiden suunnittelua. Muita suunnittelun osa-alueita ovat routamitoitus laskennalliseen routanousuun perustuen, pohjamaan ja sitomattomien kerrosten sekä sidottujen kerrosten deformaation hallinta, päällysteen nastarengaskulutuksen hallinta ja päällysteen pakkaskutistumisen hallinta (Tiehallinto 2004, s. 25). Kuormituskestävyysmitoituksen kulku on ohjeistettu tierakenteiden osalta vuonna 2018 julkaistussa Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa ja katurakenteiden suunnittelun osalta vuonna 2002 julkaistussa Katu 2002-ohjeessa. Kuten yllä todettiin, ohjeissa oleva kuormituskestävyysmitoitusmenetelmä perustuu kokemusperäisiin tietoihin hyödyntävään, osittain laskennalliseen malliin eli kokeellis-analyttiseen malliin (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 7). Aikaisemmin Suomessa käytössä olleessa Tiehallinnon aikaisessa Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa (2004) on esitelty lyhyesti myös väsymisteoriaan perustuva monikerroslaskentamalli tien kuormituskestävyyden mitoittamiseen (Tiehallinto 2004, s. 33).

Nykyisessä Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa (2018) tierakenteen kuormituskestävyysmitoitus tapahtuu seuraavasti:

1. Tien kuormituskertaluvun (KKL) laskeminen
2. Tien kuormitusluokan, päällysteen vähimmäispaksuuden ja tavoitekantavuuden määrittäminen
3. Alusrakenteen kantavuuden määrittäminen
4. Rakennekerrosten materiaalien valinta ja niiden mitoitusmoduulien määrittäminen
5. Päällysrakenteen kerrospaksuuksien mitoittaminen tavoitekantavuuteen Odemarkin kaavan avulla.

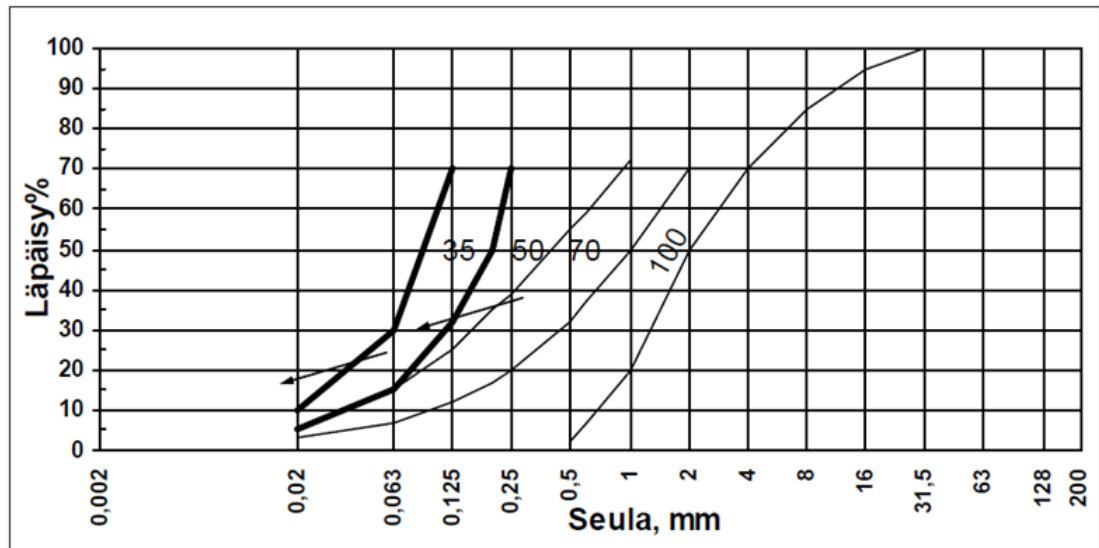
Tien kuormituskertaluku (KKL) kuvaa raskaan liikenteen aiheuttamaa rasitusta tierakenteeseen. Kuormituskertaluku ilmoitetaan standardiakselien ylityskertoina 20 vuoden ajalta. On huomattava, että ohjeessa mainittu 20 vuotta ei kerro mitään tien päällysteen tai tierakenteen kestoiästä vaan on todennäköistä, että vilkasliikenteisillä teillä on tehtävä päällysteen korjauksia jo muutaman vuoden kuluttua rakentamisesta, kun taas sitomattomien rakennekerrosten voidaan olettaa kestävän kuormia yli 20 vuoden ajan.

Tien rakennussuunnitelmaan kuormitusluokka määräytyy tien rakennussuunnitelmassa lasketun kuormituskertaluvun perusteella, mutta tien yleissuunnitelmaan kuormituskertaluku ja kuormitusluokka voidaan valita arvioidun vuorokausiliikenteen perusteella. Kuormitusluokan perusteella määräytyvät tien päällysteen vähimmäispaksuus ja tavoitekantavuus. (Liikennevirasto 2018, s. 34, 40-42)

Suunnitteluohjeiden kuormituskestävyyssmitoitus perustuu siihen, että tierakenteen pinnalta mitatulle kantavuudelle on annettu tietyt tavoitekantavuusarvot riippuen tien kuormitusluokasta. Tavoitekantavuusarvot ovat laskennallisia suureita, kuten jäljempänä Odemarkin menetelmän esittelyn yhteydessä esitetään, eivätkä niinkään rakenteesta tietyissä olosuhteissa mitattavissa olevia ominaisuuksia. Eri kuormitusluokkiin liittyville tavoitekantavuuksille on kuitenkin määritetty kokemusperäisesti tietyt tavoitearvot. Kokemusten perusteella on havaittu, että jos tierakenteen pinnalta mitatut kantavuusarvot ylittävät tavoitekantavuusarvot, voidaan tierakenteen olettaa kestävän kuormitusluokasta riippuvan liikennemäärän aiheuttamat liikennekuormitukset ilman huomattavia vaurioita. (Kalliainen et al. 2011, s. 32)

Alusrakenteelle määritetään tietty muodonmuutosmoduulin lukuarvo maan kelpoisuusluokan eli käytännössä maalajin ja maalajin hienoainespitoisuuden perusteella (Liikennevirasto 2018, s. 20-22). Sitomattomien karkearakeisten materiaalien E-moduulit arvioidaan epäsuorasti materiaalien rakeisuuskäyrien perusteella. Poikkeuksena tästä ovat standardimurskeet, joiden E-moduulit arvioidaan niiden rakeisuusluokan perusteella. Mitoituksessa käytettävät materiaalien E-moduulit ovat vakioita eli niissä ei huomioida esimerkiksi jännitystilän tai kosteustilan vaikutusta muodonmuutosmoduulin arvoon. E-moduulit siis sisältävät joukon oletuksia koskien materiaalin käyttäytymistä tierakenteessa. Tyypymateriaaleille on kuitenkin valittu sellaiset E-moduulit, jotka edustavat materiaalin käyttäytymistä sillä jännitystasolla ja niissä olosuhteissa, joissa materiaali normaaleissa suomalaisissa tierakenteissa tyypillisesti esiintyy. Lähempänä pintaa kuormituksesta johtuva tierakenteessa vallitseva jännitystila on suurempi ja alempana tierakenteessa pienempi. Näin ollen esimerkiksi suodatinhiealle on mitoitus varten määritetty alhaisemmat E-moduulit johtuen sen sijainnista tierakenteessa. (Kolisoja 1993, s. 17, 89-90;

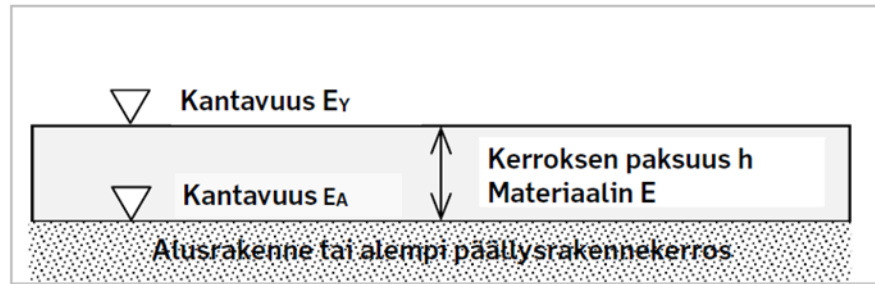
Kalliainen et al. 2011, s. 32; Liikennevirasto 2018, s. 45-49) Kuvassa 24 on esitetty suodatinkerroksen hiekan ohjeelliset rakeisuuskäyrät E-moduulin arviointia varten. Heikoin alue, jolla hiekan rakeisuuskäyrä käy, määrää hiekan moduulin. Rakeisuuskäyrä ei saa kuitenkaan ylittää paksua rajakäyrää nuolen suunnassa. (Liikennevirasto 2018, s. 49)



Kuva 24. Suodatinkerroksen hiekan moduulin arviointi hiekan rakeisuuskäyrien perusteella (Liikennevirasto 2018, s. 49).

Koska tierakenne on epähomogeeninen ja kerroksellinen, käytetään kuormituskestävyysmitoituksessa Odemarkin esittämää monikerrosrakenteen laskentamenettelyä, jota kutsutaan joissakin lähteissä Odemarkin laskentakaavaksi tai Odemarkin kantavuuskaavaksi. Odemarkin laskentamenettelyssä oletetaan, että materiaalien muodonmuutosominaisuudet ovat kerroksittain lineaarisesti kimmoisia. (Kolisjoja 1993, s. 6; Liikennevirasto 2018, s. 44)

Odemarkin laskentakaavassa käytetyt käsitteet on esitetty kuvassa 25. Laskenta tapahtuu rakennekerros kerrallaan ylöspäin, kunnes koko rakenteelle asetettu tavoitekantavuuden arvo saavutetaan (Kolisjoja 1993, s. 17; Liikennevirasto 2018, s. 45).



Kuva 25. Odemarkin laskentakaavassa käytetyt käsitteet (Liikennevirasto 2018, s. 44).

Kuormituskestävyysmitoituksessa käytetty Odemarkin laskentakaava on

$$E_y = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \left(\frac{h}{0,15} \right)^2}} \right] \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \left(\frac{h}{0,15} \right)^2 \left(\frac{E}{E_A} \right)^{2/3}}}, \quad (16)$$

jossa E_A = mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus (MPa), E_y = mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus (MPa), E = mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa), h = mitoitettavan kerroksen paksuus (m) ja 0,15 = kuormittavan pyörän kosketuspinnan laskennallinen säde (m) (Liikennevirasto 2018, s. 44).

Odemarkin laskentakaavan käyttöön liittyy muutamia ehtoja, joita tulee noudattaa. Yli 300 mm paksut sitomattomat rakennekerrokset tulee jakaa 150...300 mm paksuisiin osakerroksiin, sillä yli 300 mm tai alle 150 mm paksuisia rakennekerroksia ei voi käyttää kaavalla laskettaessa. Odemarkin laskentamenettelyssä huomioidaan vetoa kestämillä rakennemateriaaleilla eri kerrosten muodonmuutosmoduulien eli jäykkyyksien yhteensopivuus. Tarvittaessa laskennassa rajoitetaan rakennekerroksessa käytettävän sitomattoman karkearakeisen materiaalin muodonmuutosmoduuli enintään kuusikerlaiseksi mitoitettavan kerroksena alta saavutettavaan kantavuuteen nähden. (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 8; Liikennevirasto 2018, s. 44)

Odemarkin laskentakaavalla määritetään tien päällysrakenteelle sellaiset rakennemateriaalit ja rakennekerrospaksuudet, joilla saadaan täytettyä kuormitusluokan perusteella määritetty tavoitekantavuus kantavan kerroksen päältä. Kantavan kerroksen päälle tehdään ohjeessa esitetty paksuus päällysteitä. Kun päällystepaksuus täyttää ohjeessa asetetun paksuusvaatimuksen, ei tavoitekantavuutta tarvitse määrittää päällysteen päältä. Lisäksi alusrakenteen ollessa routiva on varmistettava, että tierakenteen laskennallisen routanousun tulee olla alle ohjeissa mainitun sallitun routanousun. Jos näin ei ole, tulee rakennepaksuuksia kasvattaa tai käyttää lämpöä eristäviä materiaaleja, jotta tierakenteelle sallittu routanousu ei ylitä. (Liikennevirasto 2018, s. 25, 43)

3.2.3 Katurakenteen kuormituskestävyysmitoitus Suomessa

Katurakenteen kuormituskestävyysmitoitus tapahtuu Katu 2002 -ohjeen mukaan. Kuormituskestävyysmitoitus tehdään myös Odemarkin laskentakaavan avulla. Suurimpina eroina tierakenteen kuormituskestävyysmitoitukseen ovat eri alusrakenneluokat sekä se, että tavoitekantavuudet annetaan katuluokittain. Lisäksi tierakennemateriaalien E-moduulit valitaan taulukossa esitettyjen raja-arvojen sisältä. Ohjeen lopussa on myös tyyppiesimerkit eri katuluokkien rakenteista. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 2003)

3.2.4 Suomessa käytetyn kuormituskestävyysmitoituksen arviointia

Ohjeissa oleva kuormitusmitoitusten menettely ja siinä esitettyjen tavoitekantavuusvaatimusten täyttyminen ovat osoittautuneet kohtuullisen hyviksi indikaattoreiksi tien tai kadun kuormituskestävyydelle silloin kun tierakennemateriaalit ja tierakenneratkaisut ovat perinteisiä ja niiden käytöstä on pitkäaikaisia kokemuksia (Kalliainen et al. 2011, s. 32). Uusiomateriaalien käyttö tie- ja katurakenteissa voi vaatia poikkeuksellisia rakenneratkaisuja. Lisäksi uusiomateriaalien muodonmuutosominaisuudet voivat poiketa perinteisistä luonnonkivimateriaaleista. Uusiomateriaalien kuormituskestävyydestä kerrotaan lyhyesti kappaleessa 3.4.

Tie- ja katurakenteiden kuormituskestävyyden mitoittaminen Odemarkin laskentakaavan avulla on yksinkertaista ja mitoitusta on mahdollista tehdä esimerkiksi Excel-tilin avulla. Eri vuodenaikojen vaikutusta ei kuitenkaan voida ottaa huomioon Odemarkin kaavalla tehdyssä mitoituksessa. Toisaalta koko kantavuusmitoituksen haasteena on se, että yleensä otaksutaan rakenteen jäykkyyden kuvaavan suoraan rakenteen kuormituskestävyyttä. Tierakenteessa käytettyjen materiaalien korkeat E-moduulit eivät nimittäin tarkoita välttämättä sitä, että tällaisilla rakennusmateriaaleilla rakennettaessa tierakenteen kuormituskestävyys olisi hyvä. Jos liian jäykkä rakenne rakennetaan muotoutuvamman rakenteen päälle, voi alempana olevaan rakenteeseen tulevien muodonmuutosten myötä liian jäykkä rakenne murtua. (Kolisoja 2016; Kolisoja 2017) Kuormituskestävyysmitoituksessa on tärkeää ymmärtää rakenteeseen suunniteltujen materiaalien muodonmuutoskäyttäytymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä palautuvien että palautumattomien muodonmuutosten osalta.

3.3 Kuormituskestävyyteen liittyvät laadunvalvontamittaukset

Kantavuusmittauksia käytetään apuna tie- tai katurakenteen tiiviystarkkailussa. Kuten yllä todettiin, mitä tiiviimpi tierakenne on, sitä paremmin se pystyy vastustamaan palautumattomia muodonmuutoksia. Valmiin tie- tai katurakenteen tulee täyttää sille asetetut

vaatimukset. Jos jakavalle kerrokselle on asetettu tavoitekantavuus, tulee sen täyttyä jakavan kerroksen päältä tehdyissä kantavuusmittauksissa. Jos kantavuusmittauksia ei tehdä jakavan kerroksen päältä, tehdään ne kantavan kerroksen päältä. Jos levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella saadut kantavuusmittaustulokset eivät täytä rakenteelle asetettuja tavoitekantavuuksia, tulee tarkistaa mikä tähän on syynä ja päättää sitten korjaustoimenpiteistä. (InfraRYL 2018, 21000) Liikenneviraston uudessa Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa (2018) todetaan, että tavoitekantavuuden saavuttamista ei voida valmiin rakenteen päältä osoittaa pudotuspainolaitteella tehtävillä taipumamittauksilla eikä muilla kuin ohjeessa esitetyillä kaavoilla tai mitoitusparametreilla. Kun rakenteen vaatimustenmukaisuutta arvioidaan, on arvioinnissa käytettävä todettuja kerrospaksumuksia ja käytettyjen materiaalien ominaisuuksia ja laskettava ohjeen mukaisesti näiden perusteella rakennetun päällysrakenteen kantavuus. Tätä laskettua arvoa verrataan tavoitekantavuuteen. (Liikennevirasto 2018, s. 43)

Suodatinkerrokselle sekä jakavalle ja kantavalle kerrokselle on asetettu tiiviysastevaatimukset, joiden toteutumista voidaan seurata esimerkiksi kappaleessa 2.5.3 esitettyjen tiivysmittausten avulla. Lisäksi jakavalle ja kantavalle kerrokselle on asetettu tiiviyssuhdevaatimukset levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella tehdyillä mittauksilla. Tiiviyssuhteella tarkoitetaan kahden peräkkäisen mittaustuloksen suhdetta. (InfraRYL 2018, 21000) Tiiviyssuhteelle asetetut vaatimukset perustuvat pääasiassa kokemuksperäisiin havaintoihin (Kalliainen et al. 2011, s. 31).

Levykuormituskokeessa kuormitus on lähes maarakenteen kantokyvyn suuruinen, joten kuormitus aiheuttaa aina myös pysyviä muodonmuutoksia palautuvien muodonmuutosten lisäksi. Mitä löyhempi rakenne on kyseessä, sitä enemmän ensimmäinen kuormituskerta tiivistää rakennetta. Toisen kuormituksen alkaessa maarakenteen kuormitushistoria tuntee kyseisen kuorman eli toinen kuormitus aiheuttaa lähinnä vain palautuvia muodonmuutoksia. Levykuormituskokeiden mittaustuloksista laskettu tiiviyssuhde on sitä suurempi, mitä löyhempi materiaali on ollut kokeen alkaessa. Pudotuspainolaitteen kuormitus kestää lyhyemmän aikaa kuin levykuormituskokeen aiheuttama kuormitus, joten sen rakenteeseen aiheuttama kuormitus on hellävaraisempi. Pudotuspainolaitteessa käytetään suurempaa esikuormitusta kuin levykuormituskokeessa. Suurempi esikuormitus kasvattaa ensimmäisellä mittauskerralla saatavaa E_1 -moduulia ja täten pienentää tiiviyssuhdetta. Siksi tiiviyssuhdevaatimukset pudotuspainolaitemittaukselle ovat tiukemmat kuin levykuormituskokeille. (Kalliainen et al. 2011, s. 31-32)

Levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella mitatut kantavuusarvot kasvavat tois-
tokuormituksessa, koska tierakenne tiivistyy lisää kuormituksen aikana. Näin ollen kan-
tavuusvaatimuksen tulee täyttyä vasta toisen kuormituskerran aikana. (Kalliainen et al.
2011, s. 30)

Koska levykuormituskoe ja pudotuspainolaitemittaus ovat luonteeltaan erilaisia, niillä
saadaan myös hieman erisuuruisia tuloksia samasta rakenteesta. InfraRYL:ssä ei kuiten-
kaan erotella sitä, että kummalla tavalla mitattuna tulisi rakenteelle asetettu tavoitekan-
tavuus saavuttaa. Eri mittauksilla tehtyjen tulosten välisiä yhteyksiä on tutkittu esimer-
kiksi Siikan (2006) ja Koppanan (2018) opinnäytetöissä. Siikan opinnäytetyön tuloksissa
havaittiin, että sidottujen kerrosten päältä tehtyjen mittausten osalta pudotuspainolaitte-
mittaus antoi suurempia kantavuusarvoja kuin levykuormituskoe (Siika 2006, s. 73). Kop-
panan diplomityössä keskityttiin sitomattomien rakennekerrosten päältä tehtyjen kanta-
vuusmittaustulosten eroihin. Selvää korrelaatiota ei tutkimustulosten osalta löytynyt, jo-
ten olosuhteet näyttäisivät vaikuttavan voimakkaasti siihen, kummalla mittausmenetel-
mällä saadaan suurempia tuloksia. Myös eri mittaustavoilla tehtyjen mittausten perus-
teella lasketuissa tiiviyssuhteissa havaittiin eroja, mutta selkeää korrelaatiota ei ollut
mahdollista tutkimustulosten perusteella määrittää. Merkitystä on myös sillä, että laske-
taanko levykuormituskokeella saadut E-moduulit $\sigma_{\min} \dots \sigma_{\max}$ -tulokinnan perusteella vai In-
fraRYL:n ohjeistuksen mukaisesti $0,30\sigma_{\max} \dots 0,70\sigma_{\max}$ -tulokinnan perusteella. Näitä eri tul-
kintoja käsitellään enemmän kappaleessa 2.6.2 (kuva 20). Kun levykuormituskokeella
saadut mittaustulokset laskettiin InfraRYL:n mukaisesti, saatiin suurempia kantavuusar-
voja kuin pudotuspainolaitteella. Lisäksi kun levykuormituskokeen mittaustulokset las-
kettiin InfraRYL:n mukaisesti, olivat levykuormituskokeen kantavuustulokset 20-30 %
suuremmat kuin minimi- ja maksimikuormituksen perusteella lasketut kantavuustulokset.
InfraRYL:n mukaisesti lasketuista kantavuusarvoista määritetyt tiiviyssuhteet olivat myös
suurempia kuin minimi- ja maksimikuormituksen perusteella lasketuista kantavuusar-
voista määritetyt tiiviyssuhteet. Tämä johtuu siitä, että InfraRYL:n mukainen tulkinta vai-
kuttaa enemmän E_2 -moduulin arvoon kuin E_1 -moduulin arvoon. (Koppana 2018, s. 110-
111)

On myös havaittu, että hienoainespitoinen, paljon vettä sisältävän pohjamaan päälle ra-
kennetuissa tierakenteissa pudotuspainolaitemittaukset saattavat antaa suurempia tu-
loksia kuin levykuormituskokeet. Tämä johtuu siitä, että pudotuspainolaitemittauksen ai-
heuttama kuormitus tapahtuu nopeammin eikä pohjamaassa oleva vesi ehdi poistua
huokosista mittauksen aikana. Toisaalta pudotuspainolaitteen kuormitusvaikutus ei kuor-
mitustavasta johtuen myöskään tunkeudu yhtä syvälle rakenteeseen kuin levykuormitus-
kokeessa. (Kalliainen et al. 2011, s. 29)

Kaikkien luonteeltaan pistemäisten mittausmenetelmien heikkoutena on se, että saatu tulos kuvaa tilannetta vain mittauspisteessä. Näin ollen on tärkeää kohdistaa mittauspisteet kriittisiin pisteisiin ja toisaalta myös tehdä kyllin monta tutkimusta, jotta rakenteiden tilaa voidaan tarkastella myös mittaustulosten keskiarvon ja -hajonnan avulla. (Kalliainen et al. 2011, s. 84)

Levykuormituskokeen yhteydessä on havaittu, että toisinaan suuri painuma ensimmäisessä kuormituksessa on voinut todennäköisesti aiheutua pintakerroksessa olevien rakenteiden uudelleenjärjestäytymisestä kuormituksen aikana. Tällöin pintakerros on jäänyt tiivistyksen jälkeen löyhäksi, jolloin toisessa kuormituksessa painumat pienenevät huomattavasti ja tiiviyssuhteesta tulee huomattavan suuri. Syynä voi kuitenkin olla vain löyhäksi jäänyt pintakerros, jolloin tiiviyssuhde voi antaa liian pessimistisen kuvan koko rakenteen tiiviydestä. (Kalliainen et al. 2011, s. 91) Yleisestikin voidaan pohtia, onko tiiviyssuhde aina käyttökelpoinen tiiviyden mittari. Esimerkiksi Kalliainen et al. (2011) havaitsivat tutkimuksissaan, että tiiviyssuhdevaatimus oli paljon vaikeampi saavuttaa kuin tavoitekantavuuksien arvot (Kalliainen et al. 2011, s. 147).

Pudotuspainolaite on alun perin kehitetty päällystettyjen tierakenteiden kantavuusmittauksiin. Sidotut kerrokset voidaan olettaa tasaiseksi alustaksi, kun taas sitomattoman rakenteen pinnassa kaikki anturit eivät välttämättä asetu tasaisesti mitattavalle pinnalle. Tämä voi aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. Kuormituslevyn alta mitatun maksimitaivumien avulla määritetyt E-moduulit on kuitenkin havaittu yhtä luotettaviksi kuin esimerkiksi levykuormituskokeella määritetyt E-moduulit. (Kalliainen et al. 2011, s. 93)

3.4 Kuormituskestävyys uusiomateriaalien osalta

Suomessa käytettyjen ohjeiden mukainen mitoitusmenettely ja Odemarkin laskentakaa-
van käyttö toimivat melko hyvin, kun käytetään tunnettuja luonnonkivimateriaaleja perinteisissä rakenneratkaisuissa (Juvankoski & Laaksonen 2001, s. 8). Kun käytetään epätavallisia rakenneratkaisuja tai luonnonmateriaaleista ominaisuuksiltaan poikkeavia uusiomateriaaleja, eivät tällaiset perinteiset mitoitusmenettelyt välttämättä annakaan parhainta mahdollista rakennetta tierakenteen kuormituskestävyyden kannalta (Kolisoja 2017). Kokemusperäisten mitoitusmenettelyjen kehittäminen uusille materiaaleille ja rakenteille olisi hyvin aikaa vievää, joten tulevaisuudessa esimerkiksi uusien laskennallisten menettelyjen kehittäminen voi olla tarpeen.

Erityisesti tierakenteessa aikanaan sitoutuvat uusiomateriaalit ovat eräs haaste Odemarkin laskentakaa-
vaan perustuvassa kuormituskestävyyssitoituksessa. Tällaisia uusiomateriaaleja ovat esimerkiksi masuunihiekka, betonimurske ja lentotuhka.

Nykyään pyritään lisäämään uusiomateriaalien käyttöä tie- ja katurakenteissa. Yhtenä haasteena ovat usean laadunvalvontamenetelmät, joiden tulosten raja-arvot on pitkälti määritetty kokemuksepäisesti vuosien aikana. Esimerkiksi vaikka luonnonmateriaaleista tehdyn rakenteen pinnalta mitattu kantavuus on osoittautunut käyttökelpoiseksi indikaattoriksi koko tierakenteen kuormituskestävyydelle, ei sama välttämättä päde uusiomateriaalien osalta. InfraRYL:ssa otetaan kyllä kantaa joidenkin uusiomateriaalien käyttöön ja esimerkiksi ferrokromikuonan, masuunikuonan ja BOS-teräskuonaseosten osalta todetaan, että luonnonkiviaineksia vastaavan tiiviyssuhteen saavuttaminen voi olla hankalaa. Tästä ei kuitenkaan ole havaittu seuraavan rakenteen ominaisuuksien heikkenemistä. Kantavuusmittausten tekemisen suositeltu ajankohta on 2...3 kk:n kuluttua rakentamisesta. (InfraRYL 2018, 21000, liite T1 2017)

InfraRYL:ssa viitataan usein Tiehallinnon julkaisemaan Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa-ohjeeseen (2007). Ohjeen tavoitteena on edistää turvallista sivutuotteiden käyttö Väyläviraston hankkeissa ja mm. välttää ympäristö- tai kestävyysongelmiin johtavat käyttötilanteet. (Tiehallinto 2017) Lisäksi uusiomateriaalien käytöstä maarakentamisessa on tehty useampia opinnäytetöitä. Esimerkiksi Lätin diplomityö koskien vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaanisia ominaisuuksia (2015) on kirjallisuuskatsaus useiden uusiomateriaalien jäykkyys- ja lujuusominaisuuksista. Uusiomateriaalien käyttöä pyritään lisäämään myös erilaisten ohjelmien avulla. Uusiomaarakentamisen UUMA3-ohjelma on käynnistynyt vuonna 2018. Lisäksi uusiomateriaalien materiaalitoimittajilla voi olla omat ohjeensa koskien kyseisen uusiomateriaalin käyttöä tie- ja katurakentamisessa. Esimerkiksi Outokumpu on julkaissut oman ohjeensa koskien OKTO-rakennustuotteita, Uusioaines Oy koskien Foamit Vaahtolasimursketta ja Suomen Erityisjäte Oy koskien jätteenpolton pohjakuonan hyödyntämistä. (UUMA3 2019)

4. OKTO-ERISTE

Ruostumattomassa teräksessä tulee olla kromia vähintään 10,5 %, sillä ruostumattomassa teräksessä kromi reagoi hapen kanssa muodostaen suojaavan kerroksen teräksen pinnalle. Suurin osa maailmalla tuotetusta ferrokromista käytetäänkin ruostumattoman teräksen raaka-aineena. (Hyttinen 2017) Yli 70 prosenttia maailman tunnetuista kromivaroista sijaitsee Etelä-Afrikassa. Suomessa sijaitseva Kemin kromiesiintymä on maailman neljänneksi tai viidenneksi suurin. (Kervinen 2005) Kemin kaivos on ainoa EU-alueella toimiva kromikaivos (Hyttinen 2017).

Suomessa ferrokromia tuotetaan Torniossa sijaitsevassa Outokummun tehtaassa. Ferrokromin nykyinen tuotantokapasiteetti on noin 530 000 tonnia vuodessa. (Hyttinen 2017) Ferrokromia valmistettaessa syntyy ferrokromikuonaa ja tästä kuonasta valmistetaan OKTO-rakennustuotteita. OKTO-tuotenimi on peräisin sanoista Outokumpu Tornio (Tiehallinto 2007, s. 41). Tässä työssä käsiteltävän OKTO-eristeen lisäksi muita OKTO-rakennustuotteita ovat OKTO-murske ja Croval-runkoaine. (Mustaniemi 2018; Kallio et al. 2010, s. 4) OKTO-rakennustuotteet ovat CE-merkittyjä eli niiden laadunvalvonta perustuu EN-standardien vaatimuksiin ja tuotteiden tulee täyttää niille asetetut tekniset ja kemialliset laatuominaisuudet (Mustaniemi 2018).

Terästeollisuuden ferrokromikuonatuotteet luokitellaan korkeimman hallinto-oikeuden vuonna 2005 antaman päätöksen perusteella jätteiden sijaan tuotteiksi: *”Koska yhtiö ei missään katkeamattoman prosessin vaiheessa poistanut ferrokromikuonia käytöstä, vaan valmisti niistä tuossa prosessissa edellä kerrotuin tavoin sivutuotteita, joilla oli niiden edullisten ominaisuuksien takia jatkuva vahva kysyntä, eikä tuotteiden niiden ominaisuuksia vastaavasta käytöstä myöskään aiheutunut vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle, ferrokromikuonia ja niistä valmistettuja tuotteita ei ollut pidettävä jätelaissa tarkoitettuina jätteinä.”* (KHO 2005:90)

Nykyään terästeollisuuden kuonatuotteet luokitellaan myös EU:n jätelainsäädännön mukaisesti teollisuuden sivutuotteiksi. OKTO-rakennustuotteiden käyttöön ei siten tarvita erillistä ympäristölupaa tai MARA-asetuksen mukaista ilmoitusmenettelyä (Ylimaunu et al. 2011; Mustaniemi 2018). MARA-asetuksella tarkoitetaan Valtioneuvoston asetusta eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, jonka mukaan asetuksessa tarkoitettujen jätteiden hyödyntämiseen maarakentamisessa ei tarvita ympäristölupaa tiettyjen ehtojen täytyessä (MARA-asetus 2017).

OKTO-eriste on sulasta ferrokromikuonasta granuloidulla eli rakeistamalla valmistettu kivitute, jonka raekoon vaihtelualue on 0-11 mm. OKTO-eristeen pääasiallisia käyttökohteita ovat tie- ja katurakenteiden suodatinkerrokset sekä erilaiset routaeristyskohteet ja salaojat. OKTO-eristettä voidaan käyttää myös talonrakennuskohteissa, esimerkiksi piharakenteiden routaeristeenä, kuivatuskerroksena, salaojatäytöissä tai kapillaarikatkona rakennusten alle tulevilla rakenteilla. (Kallio et al. 2010, s. 4, 19). Tässä työssä käsitellään OKTO-eristeen käyttöä tie- ja katurakenteiden suodatinkerroksessa.

4.1 OKTO-eristeen valmistusprosessi

OKTO-eristettä valmistetaan sulasta ferrokromikuonasta rakeistamalla. Ferrokromikuonaa syntyy, kun kromiitista valmistettuja rikasteita pelkistetään uppokaariprosessissa metalliseksi ferrokromiksi. (Kallio et al. 2010, s. 4) Kromimalmia louhitaan Kemin kaivokselta, josta se kuljetetaan rikastettuna jatkokäsittelyyn Tornion tehtaalle (Hyttinen 2017).

4.1.1 Kaivos

Kemin kromimalmiesiintymä löydettiin vuonna 1959. Esiintymä löytyi, kun nykyisen kaivoksen lähistöllä olevan makeavesikanavan tuntumasta löytyi kromiittilohkareita. (Koskinen 2014) Kaivostoiminta käynnistettiin vuonna 1968 ja samaan aikaan alkoi myös ferrokromin tuotanto (Hyttinen 2017). Kemin kaivoksen sijainti näkyy kuvassa 26.






Kuva 26. Kemin kaivoksen sijainti (Paikkatietoikkuna 2018).

Kemin kromiittiesiintymän pituus on 3 km ja leveys noin 40 m, joten esiintymä on veitsenterän muotoinen. Kromiittiesiintymän syvyyttä ei ole määritetty, mutta seismisten mitausten mukaan syvyys voi olla jopa useita kilometrejä. (Hytinen 2017) Kemin kaivoksella siirryttiin kokonaan maanalaiseen tuotantoon vuonna 2006 ja vuonna 2018 on käynnistetty kaivoksen päätason syventäminen 1000 metrin syvyyteen. Kemin esiintymän todennetut malmivarat ovat 50 Mt, mutta tämän lisäksi kaivosalueella on mineraalivaroja 98 Mt. Tällä hetkellä kromimalmia tuotetaan 2,7 Mt vuodessa. (Hytinen 2017; Mustaniemi 2018)

Kaivoksesta saatu kromimalmi murskataan esimurskaamossa ja nostetaan pinnalle nostokuilun kautta. Maan pinnalla malmi murskataan uudelleen ja malmi erotetaan sivukivestä painovoimaan perustuvien menetelmin, sillä sivukiven ominaispaino ($2,7 \text{ t/m}^3$) on pienempi kuin malmin ominaispaino ($3,45 \text{ t/m}^3$). Malmi rikastetaan pala- tai hienorikasteeksi. Palarikasteen tuotanto on noin 400 000 t/v ja hienorikasteen tuotanto noin 850 000 t/v. Pala- ja hienorikaste toimitetaan ferrokromitehtaalalle Tornioon jatkokäsittelyä varten. (Hytinen 2017) Malmin, palarikasteen ja hienorikasteen mineraalinen koostumus on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kromimalmin, palarikasteen ja hienorikasteen mineraaliset koostumukset (Hyttinen 2017).

Tuote		Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	SiO ₂	CaO	Cr/Fe
Malmi		26 %	11 %	16 %	21 %	18 %	2 %	1,6 %
Palari- kaste		35 %	12 %	14 %	15 %	11 %	2 %	1,7 %
Hienori- kaste		45 %	12 %	19 %	10 %	3 %	0,3 %	1,6 %

4.1.2 Tehdas

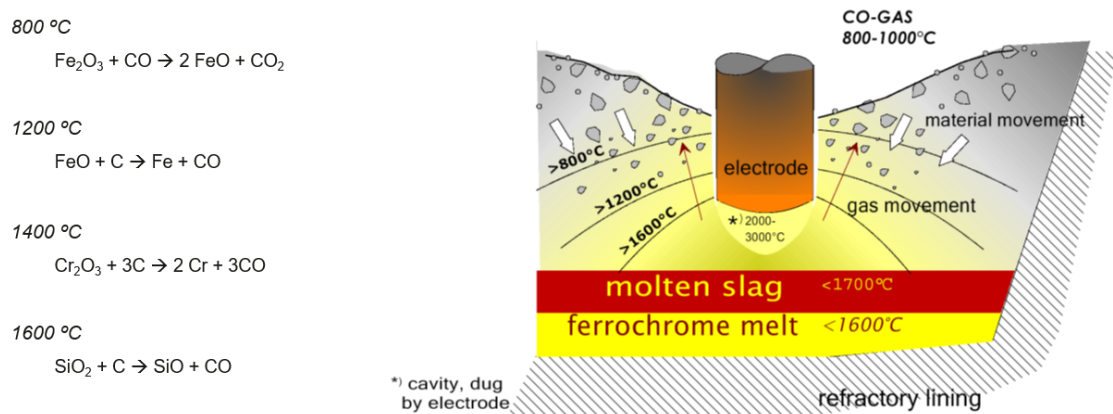
Tornion tehtaan ferrokromituotanto käynnistettiin samaan aikaan Kemin kaivostoiminnan kanssa vuonna 1959. Alussa ferrokromituotanto oli 28 000 t/v. Vuonna 1985 tehtaalla otettiin käyttöön toinen uppokaariuuni ferrokromin valmistumista varten ja vuonna 2013 kolmas uppokaariuuni VKU3. VKU3 on maailman suurin ferrokromiuuni ja sen käyttöönoton jälkeen ferrokromituotannon kapasiteetti kaksinkertaistui aiemmasta ja on nykyään noin 530 000 t/v. (Hyttinen 2017)

Palarikasteet voidaan syöttää sellaisenaan suoraan sulatusuuneihin. Hienorikasteeseen taas sekoitetaan tehtaalla bentoniittia ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4(\text{SiO}_2) \cdot \text{H}_2\text{O}$) ja koksia (C) ja tästä sekoituksesta valmistetaan pelletointirummussa pellettejä. Pelletointirummusta saatavat pelletit syötetään sintrausuuniin, jossa pelletit sintraantuvat sekä raudan ja ferrokromin oksidit pelkistyvät. Pellettejä tuotetaan noin 800 000 tonnia vuodessa. (Hyttinen 2017)

Ferrokromin valmistusta varten uppokaariuuneihin syötetään hienorikasteesta valmistettuja pellettejä, palarikastetta, koksia ja kvartsiittia (SiO_2) (Hyttinen 2017). Koksista peräisin oleva hiili toimii reaktioissa pelkistimenä. Muilla ferrokromin valmistuksen aikana lisätyillä aineilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi malmin sulamislämpötilaan tai viskositeettiin. Esimerkiksi kvartsiitti tekee kuonan juoksevammaksi. (Erdem et al. 2005, Anttila 2016, s. 5 mukaan)

Uppokaariuunin yläosan kaasutilavuus on suurimmaksi osaksi hiilimonoksidia. Malmi kuumentuu ja pelkistyy kiinteässä olomuodossa. Kromin oksidien pelkistyminen voi alkaa vasta kun raudan oksidien pelkistyminen on tarpeeksi pitkällä. Lopulta malmi sulaa elektrodikärkien ympärillä. Sulamiseen tarvittava lämpötila saadaan elektrodikärkien väliin muodostuvan valokaari-ilmion avulla. Sula metalliseos painuu uppokaariuunin pohjalle ja metalliseoskerroksen päälle asettuu sula kuonakerros. Ferrochromikuonakerrokseen kerääntyvät malmin pelkistymättä jäänyt kromiitti ja muut oksidit sekä prosessin tehostamista varten lisätyt aineet, kuten kvartsiitti. (Erdem et al. 2005, Anttila 2016, s. 5 mukaan) Kuvassa 27 näkyvät uppokaariuunin reaktiovyöhykkeet ja pelkistymisreaktiot.

Reaktiovyöhykkeet uppokaariuunissa



Kuva 27. Reaktiot ja reaktiovyöhykkeet uppokaariuunissa (Hyttinen 2017).

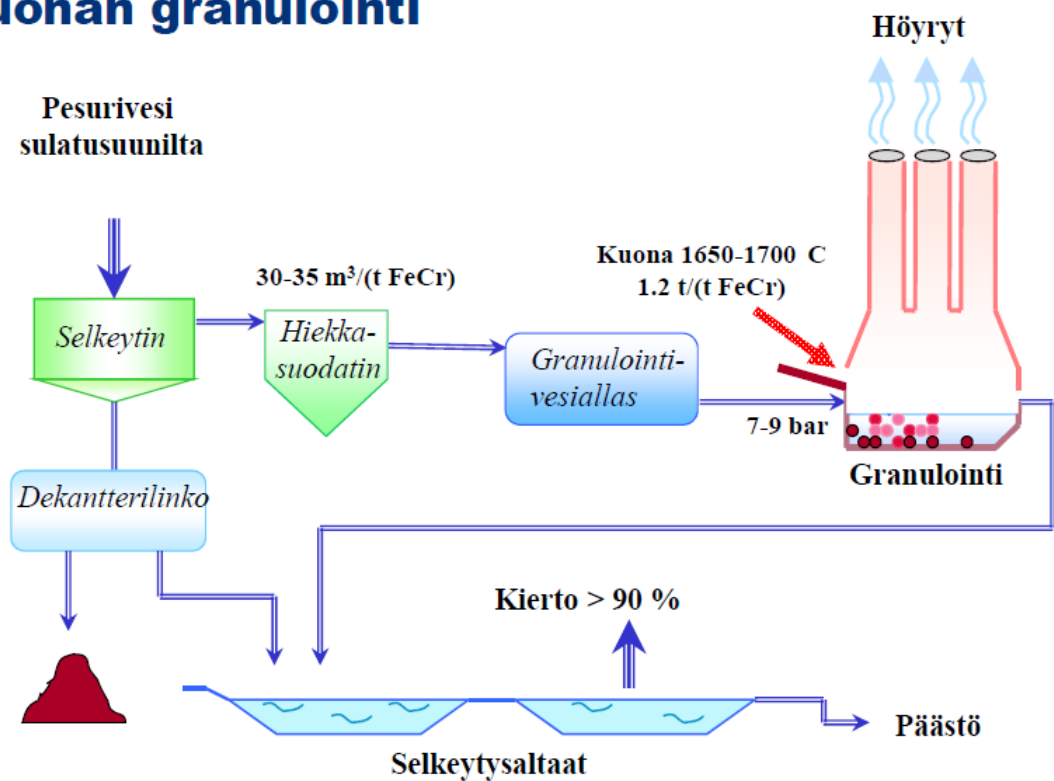
Sulaa ferrokromia lasketaan uunista noin 2,5 tunnin välein. Tehtaalta ferrokromi lähtee jatkokäsittelyyn terässulattoon ja muihin terästehtaisiin. Terässulatolla valmistetaan terästä, joka menee kuuma- ja kylmävalssaamoihin. Kylmävalssatut tuotteet menevät vielä jatkokäsittelylaitokseen Hollantiin. Ferrokromia syntyy vuodessa noin 530 000 tonnia. (Hyttinen 2017)

Ferrokromin tuotantoprosessissa syntyvän sulan ferrokromin tuotekoostumus on 54 % Cr, 35 % Fe, 7 % C ja 4 % Si. Sulan ferrokromin lisäksi ferrokromin tuotantoprosessissa syntyy sulaa ferrokromikuonaa ja kaasua. Kaasusta suurin osa on hiilimonoksidia, jota hyödynnetään energiantuotannossa. (Hyttinen 2017) Ferrochromikuonaa syntyy n. 650 000 tonnia vuodessa. Tästä kuonasta valmistetaan OKTO-rakennustuotteita. (Mustaniemi 2018)

Noin 2/3 osaa ferrokromikuonasta granuloidaan suoraan vesisuihkun avulla hiekan tapaiseksi OKTO-eristeeksi. OKTO-eristettä syntyy vuosittain noin 500 000 tonnia. (Hytti-

nen 2017). OKTO-eristeen rakeistuksessa sula ferrokromikuona juoksutetaan sulatusuunista ensin valuastioihin ja sieltä suoraan paineelliseen vesisuihkuun. Vetenä käytetään sulatusuunilta tulevaa pesurivettä, joka kulkee hiekkasuodattimen läpi granulointivesialtaaseen. Paineellinen vesisuihku rakeistaa sulan kuonan raekooltaan 0/11 mm tuotteeksi. Granuloitu tuote siirretään jäähdytsaltaalta valutuskasalle ja toimitetaan sieltä välivarastoon. Suurin osa rakeistamisprosessissa käytetystä vedestä kiertää takaisin prosessi- ja jäähdytysvesijärjestelmään. (Kallio et al 2010, s. 4; Ylimaunu et al. 2011) Kuonan granulointiprosessi on esitetty kuvassa 28 ja valmista OKTO-eristettä kuvassa 29.

Kuonan granulointi



Kuva 28. Kuonan granulointiprosessi (Ylimaunu et al. 2011).



Kuva 29. OKTO-eriste (Kallio et al. 2010, s. 6).

Noin 1/3 osa ferrokromikuonasta valetaan valuojiin, joissa sen annetaan jähmettyä. Jähmettyneestä kuonasta erotellaan kuonarikastamolla metallit ja kuona murskataan ja seulotaan eri kokoisiksi murskeiksi (kuva 30). Syntynyttä OKTO-mursketta käytetään mm. asfaltissa. (Hyttinen 2017)



Kuva 30. Eri kokoisia OKTO-murskeita (Kallio et al. 2010, s. 6).

4.2 Mineralogia

OKTO-eristeen tyypillinen mineraalikoostumus on esitetty taulukossa 6. Kromi ja rauta esiintyvät osittain oksidisinä yhdisteinä ja osittain metalleina (Kallio et al. 2010, s. 5).

Taulukko 6. OKTO-eristeen tyypillinen mineraalikoostumus (Kallio et al. 2010, s. 5; Ylimaunu et al. 2011, Hyttinen 2017).

Mineraali	Prosenttiosuus
SiO ₂	30 %
Al ₂ O ₃	26 %
MgO	23 %
Fe _{TOT}	4 %
Cr	8 %
CaO	2 %

Ferrokromikuonasta ensimmäiseksi kiteytyvä faasi on kiteinen Fe-Mg-Cr-Al-spinellimineraali. Metallipisarot ovat sulkeumina tällaisissa spinelleissä ja itse spinellit ovat sulkeutuneet amorfisen lasifaasin sisään. Ferrokromikuonassa oleva kromi on kiinnittynyt tiukasti osaksi spinelliä. (Inkeröinen & Alasaarela 2010, s. 48; Kallio et al. 2010, s. 5; Ylimaunu et al. 2011) OKTO-eristeen mineralogian vuoksi OKTO-eristerae on tiivis ja osin kiteinen. Valmistusmenetelmänsä vuoksi OKTO-eriste on pesuseulottu tuote ja sen hienoaineksen määrä on vähäinen. OKTO-eristeen sulamispiste on 1700 °C ja emäksisyys on noin 0,45. (Kallio et al. 2010, s. 5; Ylimaunu et al. 2011)

4.3 Laadunvalvonta

OKTO-rakennustuotteiden laatuun vaikutetaan tarkalla panosmateriaalien valinnalla, panoksen ohjauksella ja analysoinnilla. Näin sulatusuunissa tapahtuvassa prosessissa saadaan kuonalle tietty kemiallinen koostumus sekä halutut tekniset ja kemialliset ominaisuudet. Ferrokromikuona prosessoidaankin jo sulafaasista alkaen CE-merkityiksi tuotteiksi. OKTO-eristeellä on standardin SFS-EN 13242 (Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset) mukainen CE-merkintä. CE-merkittyjen tuotteiden laadunvalvonta perustuu EN-standardien vaatimuksiin ja tuotteiden tulee täyttää niille asetetut tekniset ja kemialliset laatuominaisuudet. (Kallio et al. 2010, s. 4-5, Mustaniemi 2018) OKTO®-rakennustuotteet on rekisteröity tuotemerkki ja kuuluvat tuotevastuulain piiriin. (Mustaniemi 2018) Tuotteen suoritustason pysyvyyden arvioinnissa ja varmentamisessa on käytössä viisi järjestelmää,

joista OKTO-rakennustuotteiden osalta on käytössä AVCP-luokka 2+. Laadunvalvonnan osalta testaustiheys on tällöin tiheämpi kuin normaaleilla kiviaineksilla. Tehtaalla on itse-testausoikeudet ja tämän lisäksi tehtaalla tehdään ulkopuolinen laadunvarmistus kaksi kertaa vuodessa. (Mustaniemi 2017)

OKTO-eristeestä otetaan päivittäin näytteitä ja päivittäisistä näytteistä tehdään viikoittaiset kokoomanäytteet (Mustaniemi 2017, haastattelu). Viikoittaisista kokoomanäytteistä määritetään OKTO-eristeen rakeisuus (Kallio et al. 2010, s. 5) Päivittäin kerättyjen näytteiden avulla voidaan varmistaa, että OKTO-eristeen rakeisuus pysyy tuotteelta vaaditulla rakeisuusalueella eikä tuote ole epäkuranttia esimerkiksi sulatusuunissa olevan haihtumisen takia. Epäkuranttia tuotetta ei laiteta myyntiin vaan se voidaan käyttää esimerkiksi tehtaalla omalla alueella. (Mustaniemi 2017)

InfraRYL:ssä on esitetty vaatimuksia suodatinkerroksessa käytettävälle ferrokromikuonalle sekä suositukset materiaalin testaustiheydeksi. Ne on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. *InfraRYL:ssä esitetyt vaatimukset ja suositukset testaustiheydeksi ferrokromikuonalle (InfraRYL 2018, 21000, liite T1 2017).*

Ominaisuus	Vaatus	Testaustiheys
Raekokajakautuma	G _F 80	Kerran viikossa
Hienoainespitoisuus	f ₇	Kerran viikossa
Kiintotiheys	Ilmoitettu arvo	Kerran vuodessa
Jäädytys-sulatuskestävyys	F _{NR}	-
Happoliukoiset sulfaatit	AS _{NR}	-
Kokonaisrikki	S ₁	Kerran vuodessa

OKTO-eristeelle tehdään säännöllisesti myös liukoisuuden laadunvalvontatestejä. Testit tehdään standardin SFS-EN 12457-2 ravistelutestin (LS=10 l/kg) mukaisesti. Liukoisuustestissä analysoidaan komponenttien mm. Cr, Cr⁶⁺, Mo ja F⁻ liukoisuudet. (Kallio et al. 2010, s. 5; Ylimaunu et al. 2011) Liukoisuustestien tuloksia on käsitelty kappaleessa 4.4.5.

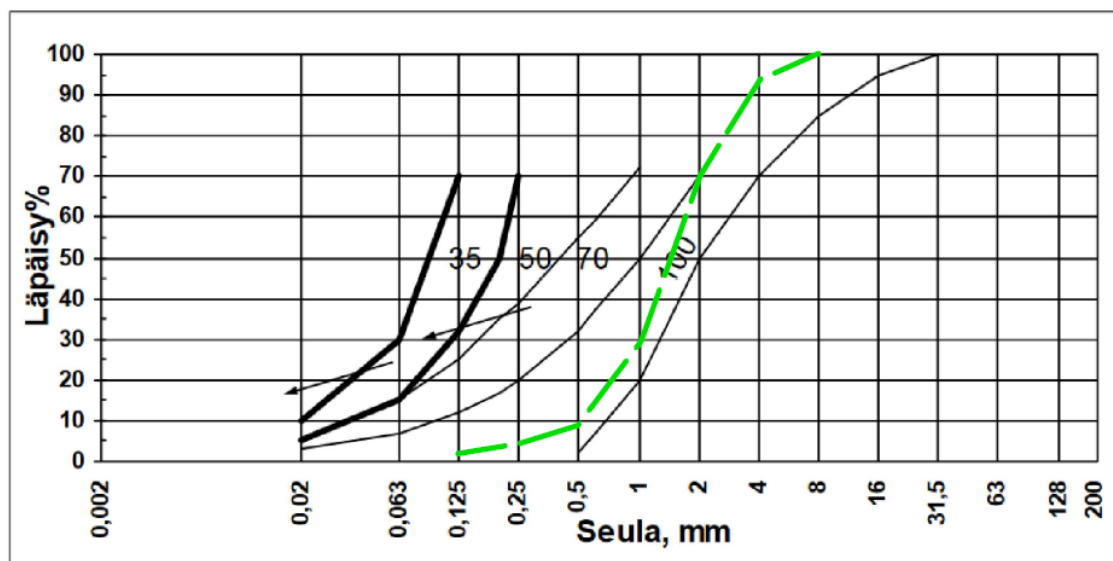
OKTO-rakennustuotteet ovat standardin SFS 5904 (Terästeollisuuden kuonatuotteet maa- ja tienrakennuskäyttöön - sitomattomat seokset) mukaisia. Standardissa esitetään vaatimukset Suomessa käytetyille terästeollisuuden kuonatuotteille, kun niitä käytetään sitomattomina maa- ja tienrakennusmateriaaleina. Standardissa myös vertaillaan OKTO-eristeen keskeisiä maa- ja tienrakennusominaisuuksia tavanomaisen luonnon kiviaineksen, graniitin, ominaisuuksiin. (SFS 5904 2004)

4.4 OKTO-eristeen ominaisuuksia

OKTO-rakennustuotteiden hyötykäyttötapoja ja ominaisuuksia on tutkittu sekä laboratoriotutkimusten että koerakenteiden avulla koko sen käyttöhistorian ajan eli vuodesta 1969 alkaen. (Kallio 2010, s. 3) Seuraavissa kappaleissa on esitetty OKTO-eristeen ominaisuuksia perustuen pääosin vuonna 2010 julkaistuun OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeeseen (Kallio et al. 2010).

4.4.1 Tekniset ominaisuudet

OKTO-eristeen tyyppirakeisuus on 0/11 mm. Rakeisuudeltaan tuote sopii suodatinkerroksen hiekaksi sekä muihin täyttöihin hiekkaa korvaamaan. (Kallio et al. 2010, s. 6) Kuvassa 31 on esitetty vihreällä katkoviivalla OKTO-eristeen tyyppinen rakeisuuskäyrä yhdessä suodatinkerrokseen sopivan hiekan rakeisuusohjealueen kanssa. Suodatinkerroksen hiekan E-moduulia voidaan arvioida hiekan rakeisuuskäyrän perusteella ja heikoin alue, jolla hiekan rakeisuuskäyrä käy, määrää sen Odemarkin laskentakaavassa käytettävän E-moduulin (kappale 3.2.2, kuva 24).



Kuva 31. OKTO-eristeen tyyppinen rakeisuuskäyrä yhdessä suodatinkerroksen hiekan E-moduulin määrittävien rakeisuusohjekäyrien kanssa (perustuu Kallio et al. 2010, s. 7; perustuu Liikennevirasto 2018 s. 49).

OKTO-eristeelle määritetyt tekniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 8. Suositukset mitoituksessa käytettäväksi arvoiksi on esitetty suluissa.

Taulukko 8. OKTO-eristeen tekniset ominaisuudet (Kallio et al. 2010, s. 6, 11).

Ominaisuus	OKTO-eristeelle määritetty arvo
Kiintotiheys	3,02...3,15 t/m ³ (3,0 t/m ³)
Kuivairtitiheys	1,10...1,35 t/m ³ (1,20 t/m ³)
Maksimikuivatilavuuspaino	17,9...18,4 kN/m ³ (18,0 kN/m ³)
Optimivesipitoisuus	7,0...10,5 % (10,5 %)
Rakenneteoreettinen tilavuuspaino	1,65...1,80

4.4.2 Mekaaniset ominaisuudet

OKTO-eristeen mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 9. Suositukset mitoituksessa käytettäviksi arvoiksi on esitetty suluissa. OKTO-eristeen leikkauskestävyyskulma ja koheesio on määritetty staattisten kolmiaksiaalikokeiden avulla. Mitoituksessa ei saa käyttää yhtä aikaa sekä suurta leikkauskestävyyskulman että koheesio arvoa. OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamisoheudessa OKTO-eristeen Odemarkin laskentakaavaa käyttävässä kuormituskestävyysmitoituksessa suositellaan käytettäväksi E-moduulina 100 MPa:a. (Kallio et al. 2010, s. 10)

Taulukko 9. OKTO-eristeen mekaaniset ominaisuudet (Kallio et al. 2010, s. 10-11).

Ominaisuus	OKTO-eristeelle määritetty arvo
Leikkauskestävyyskulma (kitkakulma)	39...42° (38°)
Koheesio	27 kPa (25 kPa)

Odemark-mitoituksessa käytettävä OKTO-eristeen E-moduulin arvo perustuu sekä OKTO-eristeen tyyppirakeisuuskäyrään että Odemarkin laskentakaavalla koerakenteesta sekä seurantakohteista tehtyihin takaisinlaskentoihin. Kuten kuvasta 31 nähdään, OKTO-eristeen tyyppirakeisuuskäyrä sijoittuu sille osuudelle, jolla suodatinkerroksessa käytettävän hiekan E-moduuli määritellään 100 MPa:ksi.

Koerakenteesta tehty takaisinlaskennat on tehty Oulussa sijaitsevasta Maukuntien koerakenteesta AB-päällysten päältä mitattujen kantavuusmittausten tulosten perusteella sekä kahden että kolmen vuoden kuluttua rakentamisesta. Takaisinlaskennat on suoritettu muuttamalla koerakenteiden materiaalien Odemarkin laskentakaavassa käytettyjä kimmomoduuleja niin, että päällysteen päältä mitattu kantavuuden keskiarvo ja laskettu

kantavuus saatiin vastaamaan toisiaan. OKTO-eristeelle käytetään Odemarkin laskentakaavan mukaisessa kuormituskestävyysmitoituksessa samaa moduulien 6x -sääntöä kuin luonnonkiviaineksille. (Kallio et al. 2010, s. 6, 9) Takaisinlaskenta on esitetty kuvassa 32.

materiaalin nimi	paksuus (m)	Kinnonmoduulit			Kantavuus (MN/m ²)
		annettu (MN/m ²)	Max 6 x	käytetty (MN/m ²)	
AB	0.05	2500	0	2500	215
Kantava KaM	0.20	280	1	280	174
Jakava KaM	0.20	280	1	280	119
Okto-eriste	0.25	100	1	100	64
Okto-eriste	0.20	100	1	100	39
$\bar{\sigma}$	0.90				20

Kuva 32. Takaisinlaskentatulokset Maukuntien koerakenteesta (Kallio et al. 2010, s. 10).

OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeesta huolimatta esimerkiksi Oulun kaupungin julkaisemassa Katurakenteiden suunnitteluohjeessa (2017) käytetään kuormituskestävyysmitoituksessa OKTO-eristeen E-moduulina kuitenkin 70 MPa:a. Muilta osin ohjeessa viitataan OKTO-rakennustuotteiden suunnitteluohjeeseen. (Oulun kaupunki 2017, s. 19) Standardissa SFS 5904 taas annetaan OKTO-eristeelle E-moduulin vaihteluväliksi 100...150 MPa "mitoitettaessa rakenne kuukauden ikäisenä" (SFS 5904 2004).

Tätä työtä varten haastateltu asiantuntija vertailee kokemustensa perusteella OKTO-eristeen ja hiekan käyttäytymistä. OKTO-eriste on tasarakeinen materiaali ja normaalisti tasarakeinen materiaali on huonosti liikennöitävissä, jos sen E-moduuli on pieni. OKTO-eriste kestää kuitenkin esimerkiksi kuorma-auton liikennöinnin, joka antaisi viitteitä siitä, että E-moduuli on ainakin 100 MPa kun verrataan OKTO-eristettä E-moduuliin 100 MPa:n hiekan kokemuseräiseen käyttäytymiseen kuormituksen alla. (Mosorin 2018)

OKTO-eristeen jännitystilasta riippuvia jäykkyysmoduuleja on määritetty Tampereen teknillisessä yliopistossa syklisten kolmiaksaalikokeiden avulla. Vertailumateriaalina käytettiin hiekkaa, jonka rakeisuuteen perustuva E-moduuli oli 70 MPa. Kostealla näytteellä vertailuhiekka ja OKTO-eriste saavuttivat lähes samat moduuliarvot. Kun näytteiden vesipitoisuutta kasvatettiin, vertailuhiekan moduuliarvot olivat selvästi matalammat ja kuormitustason noustessa näyte hajosi täysin, kun taas OKTO-eristeen moduuliarvot olivat näytteen kyllästämisen jälkeen vain hieman pienemmät kuin kostealla OKTO-eristenäytteellä. (Kallio et al. 2010, s. 9) OKTO-rakennustuotteille ei ole määritetty omaa väsymisfunktioita, joten OKTO-eristerakenteiden kuormituskestävyysmitoitus tulee tehdä Odemarkin laskentakaavalla eikä analyyttisellä kuormitusmitoituksella (Kallio et al. 2010, s. 16).

4.4.3 Lämpötekniset ominaisuudet ja routivuus

OKTO-eriste on huokoinen materiaali ja sen vuoksi sillä on hyvä lämmöneristyskyky. OKTO-eristeen lämmönjohtavuuskokeet on tehty standardin ASTM D 5334-92 mukaan. Lisäksi materiaalin lämpötekniisiä ominaisuuksia on seurattu koerakenteisiin asennettujen lämmönjohtavuussondien avulla. Koerakenteista saadut tulokset ovat olleet yhteneviä laboratoriotutkimusten tulosten kanssa. (Kallio et al. 2010, s. 8) Taulukossa 10 on esitetty OKTO-eristeen sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus sekä optimikosteudessa että kyllästyneessä tilassa. Suositukset mitoituksessa käytettäviksi arvoiksi on esitetty suluissa.

Taulukko 10. *OKTO-eristeen sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus optimikosteudessa ja kyllästyneessä tilassa (Kallio et al. 2010, s. 8, 11).*

OKTO-eristeen tila	Lämmönjohtavuus (W/Km)
sula, optimikosteus (w = 9 %)	0,55...0,56 (0,6)
jäätynyt, optimikosteus (w = 9 %)	0,66...0,69 (0,7)
sula, kyllästetty	0,91...0,95 (1,0)
jäätynyt, kyllästetty	1,88...1,89 (1,9)

Suomessa käytetyssä tierakenteen suunnitteluohjeessa routamitoitus perustuu laskennalliseen routanousuun, jolloin materiaalin lämpötekniisiä ominaisuuksia kuvataan eristävyyskannalta vastaavuuskertoimella ja materiaalin routivuutta routaturpoamalla. Hiekan vastaavuuskerroin eristävyyskannalta on 1 ja muiden materiaalien eristävyttä verrataan hiekan arvoon. (Liikennevirasto 2018, s. 28) Lämmönjohtavuuksien avulla määritetty OKTO-eristeen vastaavuuskerroin on 1,5. Routanousukokeiden, rakeisuuden ja kapillaarisuuden perusteella OKTO-eriste on routimaton materiaali, joten sen routimiskerroin eli segregatiopotentiaali on 0 mm²/Kh ja routaturpoama on 0 %. (Kallio et al. 2010, s. 8)

4.4.4 Hydrauliset ominaisuudet

OKTO-eristeen kapillaarinen nousukorkeus on alle 20 cm, joten materiaalissa ei tapahdu merkittävää veden kapillaarista nousua. Routimattomalla materiaalilla kapillaarisen nousukorkeuden tulee olla alle 1 m. OKTO-eristeen huokoisuuden vuoksi sille ei ole tehty jäädytys-sulatustestiä, mutta materiaalin vedenimeytyminen on hyväksyttävissä rajoissa

rajan ollessa yleensä $\leq 1,0$ %. (Kallio et al. 2010, s. 8-9) OKTO-eristeen hydrauliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 11. Suositukset mitoituksessa käytettäväksi arvoiksi on esitetty suluissa.

Taulukko 11. OKTO-eristeen hydrauliset ominaisuudet (Kallio et al. 2010, s. 9, 11).

Ominaisuus	OKTO-eristeelle määritetty arvo
Vedenimeytyminen	0,3 % (0,5 %)
Veden adsorptioluku	1,6 % (1,6 %)
Ominaispinta-ala	1,1 m ² /g (1,1 m ² /g)
Veden adsorptiokyky	14,5 mg/m ²
Kapillaarisuus	0,10...0,20
Veden imukorkeus	225 mm
Vedenläpäisevyys	10 ⁻³ ...10 ⁻⁴

4.4.5 Ympäristöominaisuudet

Sulatusuuniprosessissa saadaan OKTO-eristeelle tietty kemikaalinen koostumus ja tämä kemiallinen koostumus määrää pitkälti myös OKTO-eristeen ympäristöominaisuudet. (Kallio et al 2010, s. 4) OKTO-eristeen mineralogiaa on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.

Liukoisuuden laadunvalvontatestien perusteella OKTO-eristeen liukoisuudet ovat niin pieniä, että ne alittavat esimerkiksi Valtioneuvoston eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa -asetuksessa eli MARA-asetuksessa asetetut raja-arvot maarakentamisessa hyödynnettäville jätteille. OKTO-eriste ei kuitenkaan sisälly tämän MARA-asetuksen piiriin, sillä kuten aiemmin on todettu, OKTO-rakennustuotteet luokitellaan tuotteiksi, joiden käyttöä varten ei tarvita ympäristölupaa eikä MARA-asetuksen mukaista ilmoitusta. Taulukossa 12 on verrattu OKTO-eristeestä määritettyjä liukoisuuksia alimpiin MARA-asetuksessa sallittaviin liukoisuuksiin. (MARA-asetus 2017, Ylimaunu et al. 2011)

Taulukko 12. *Ferrokromikuonan liukoisuuksien vertailu MARA-asetuksen liukoisuuksiin (MARA-asetus 2017, Ylimaunu et al. 2011).*

Haitallinen aine	Liukoisuus ferrokromikuonatuotteissa (mg/kg, LS=10 l/kg)	Alin MARA-asetuksessa sallittu liukoisuus (mg/kg, LS=10 l/kg)
Kromi (Cr)	0,084...0,112	0,5
Arseeni (As)	<0,105	0,5
Kadmium (Cd)	< 0,011	0,04
Elohopea (Hg)	< 0,01	0,01
Fluoridi (F ⁻)	4,22...6,30	10
Molybdeeni (Mo)	< 0,056	0,5
Nikkeli (Ni)	< 0,105	0,4
Sinkki (Zn)	< 0,941	4

Kuten ferrokromikuonan liukoisuustuloksista havaitaan, esimerkiksi kromin liukoisuusarvot ovat hyvin pienet huolimatta siitä, että kuonassa on noin 8 % kromia. Ferrokromikuonassa kromin pitoisuus on korkea, mutta liukoisuus vähäistä. Tämän selittää ferrokromikuonan mineralogia. (Inkeröinen & Alasaarela 2010, s. 47) Ferrokromikuonan mineralogiaa tutkittaessa on havaittu, että kromin liukoisuus spinellifaasia sisältävästä kuonasta on hyvin vähäistä. Lisäksi kuonan spinellit ovat vähemmän kromia sisältävän lasifaasin sisällä. Lasifaasilla on raskasmetalleja sitovia ominaisuuksia. Nämä tekijät selittävät sen, että vaikka kromin pitoisuus on korkea niin sen liukoisuus on vähäistä. (Makkonen & Tanskanen 2005, Inkeröinen & Alasaarela 2010, s. 48 mukaan)

4.5 OKTO-eristeen käyttö infrarakentamisessa

OKTO-eristettä käytetään tie- ja katurakenteen suodatinkerroksissa sekä erilaisissa roustaeristyskohteissa ja salaojissa. Tässä työssä keskitytään OKTO-eristeen käyttöön tie- ja katurakenteen suodatinkerroksissa. (Kallio et al. 2010, s. 4). OKTO-eristettä on käytetty infrarakentamisessa 1970-luvulta lähtien (Kallio et al. 2010, s. 3; Mustaniemi 2017, haastattelu). OKTO-eristeen käyttöön ei siis tarvita erillistä ympäristölupaa tai MARA-asetuksen mukaista ilmoitusmenettelyä (InfraRYL 2018, 21110.1.1).

4.5.1 Käyttökohteet

OKTO-eristettä kuljetetaan kustannussyistä maanteitse, joten OKTO-eristeen päämarkkina-alue on noin 150 km säteellä Tornion tehtaalta. Käytännössä OKTO-eristettä kuljetetaan Oulun, Kemi-Tornion ja Rovaniemen talousalueille sekä Pohjois-Ruotsiin Haaparantaan. (Mustaniemi 2017, haastattelu) Esimerkiksi Oulun kaupungissa OKTO-eristettä käytetään keskimäärin noin 100 000 tonnia vuodessa. Ylijäänyt OKTO-eriste käytetään tehtaan omiin tarkoituksiin, esimerkiksi varastoalueiden tekoon. (Mustaniemi 2017, haastattelu)

Koska OKTO-eriste ei kovetu rakenteissa, OKTO-eristettä voidaan käyttää uudelleen. Sitä käytetään erityisesti niillä katuosuuksilla, joilla on paljon putkia ja joissa on tarpeen esimerkiksi kunnallistekniikan korjaamisen vuoksi avata rakenteita. (Mustaniemi 2017, haastattelu; Mosorin 2018)

OKTO-eristeen hinta on karkeasti tarkasteltuna noin kaksinkertainen luonnon kiviaineksen hintaan verrattuna (Mustaniemi 2017). OKTO-eristeen lopulliset kustannukset verrattuna suodatinkerroksen hiekkaan tai muihin luonnonkiviaineisiin määräytyvät monien tekijöiden perusteella. Koska OKTO-eristeellä on hiekkaa parempi lämmöneristävyys, voidaan käyttämällä sitä hiekan sijaan ohentaa tie- tai katurakenteita erityisesti routivilla pohjamailla. Routivilla pohjamailla tie- tai katurakenteen lopullisen paksuuden määrää tyypillisesti routamitoitus eikä kuormituskestävyyssmitoitus. Koska OKTO-eristettä tarvitaan vähemmän kuin luonnon kiviaineita, säästetään materiaalin määrän lisäksi kaivukustannuksissa sekä kaivettujen massojen poiskuljetuksessa. Jos suodatinkerrokseen sopivaa hiekkaa on saatavilla lähempää kuin OKTO-eristettä, vaikuttavat kuljetuskustannukset hiekan ja OKTO-eristeen käytöstä johtuviin kustannuseroihin.

Tilaajien ja urakoitsijoiden asenteet uusiomateriaaleja kohtaan vaikuttavat OKTO-eristeen käyttöön (Mustaniemi 2017). Kustannusvertailun rinnalla tulisi huomioda se, että OKTO-eristeen käytöllä säästetään neitseellisiä kiviaineita. Jo suunnitteluvaiheessa uusiomateriaalien käytön tulisi olla yksi vaihtoehtoratkaisu, sillä perinteisille luonnonkiviaineille tehdyt suunnitteluratkaisut eivät välttämättä ole parhaita mahdollisia ratkaisuja uusiomateriaaleille (Mustaniemi 2017). Esimerkiksi Oulun seudulla työmailla suhtaudutaan OKTO-eristeen käyttöön nykyään hyvin ja OKTO-eristeen etuna nähdään sen hyvä lämmöneristävyys verrattuna hiekkaan (Mosorin 2018).

4.5.2 Olosuhdeherkkyys ja rakennettavuus

Kun OKTO-eristettä käytetään tie- ja katurakenteissa, noudatetaan voimassa olevan InfraRYL:n laatuvaatimuksia ja työselityksiä aivan kuten luonnonkiviainestenkin tapauksessa. Lisäksi sovelletaan OKTO-rakennustuotteiden suunnitteluohjeessa olevaa rakentamisen työselitystä. (Kallio et al. 2010, s. 18)

Tiivistettävyyys

OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamishjeessa annetaan tiivistykseen liittyviä yleisiä ohjeita, kuten esimerkiksi ohjeelliset tiivistysmäärät. Ohjeelliset tiivistysmäärät näkyvät taulukossa 13. Kerralla tiivistettävän kerroksen maksimipaksuus on 500 mm. Suunnitteluohjeen mukaan OKTO-eristeen päällä voidaan liikennöidä esimerkiksi kuorma-autolla heti tiivistämisen jälkeen. (Kallio et al. 2010, s. 6) Ohjeessa ei oteta kantaa OKTO-eristeelle parhaiten soveltuvaan tiivistysmenetelmään eikä eri tiivistyslaitteilla tiivistettävien kerrosten paksuuteen.

Taulukko 13. OKTO-eristeen ohjeelliset tiivistysmäärät (Kallio et al. 2010, s. 7).

Tiivistyslaite	Tiivistyslaitteella tehtävien ylityskertojen lkm tiivistettävän kerroksen päällä
Tärylevy 150 kg	4
Tärylevy 455 kg	2..3
Täryjyvä 5...8 tn	3...4
Täryjyvä > 8 tn	2...3
Kumipyöräjäyvä < 15 tn	5...7
Kumipyöräjäyvä > 15 tn	5...6

OKTO-eristeen tiivistämistä verrataan usein hiekan tiivistämiseen, sillä molempia käytetään suodatinkerroksen materiaalina. OKTO-eristeen rakeen muoto ja mineralogia ovat kuitenkin erilaisia kuin hiekalla. Lisäksi OKTO-eristeessä ei ole hienoaainesta käytännössä lainkaan, kun taas suodatinhiekan hienoaainepitoisuus voi olla jopa 15 %. Työtä varten haastatellun asiantuntijan mukaan OKTO-eriste kyllä tiivistyy helposti, mutta kokemusten perusteella dynaamiset tiivistysmenetelmät eivät välttämättä sovellu OKTO-eristeelle yhtä hyvin kuin staattiset tiivistysmenetelmät. Syitä tähän voivat olla esimerkiksi, että dynaamiset tiivistysmenetelmät jättävät OKTO-eristeen pinnan hyvin irtomaiseksi, mutta riittävän staattisen kuormituksen alla OKTO-eristeen rakeet lukkiutuvat paremmin toisiinsa kiinni. Näin ollen esimerkiksi kumipyöräjäyvä olisi parempi vaihtoehto

tiivistämiseen kuin täryjyry. Jos ajokertoja on liikaa, rakeet voivat hienontua. Tiivistämisessä tulee myös huomioida, että tiivistetäänkö pengerrakennetta vai maalaatikkorakennetta. (Mosorin 2018)

Mitä tulee tiiviiden laatuvaatimuksiin, säteilyyn perustuva Troxler-mittaus ei ole sopiva vaihtoehto OKTO-eristeen tiiviyssasteen määrittämiseksi (Mustaniemi 2017; Mosorin 2018). Sama pätee moniin muihinkin uusiomateriaaleihin, kuten kappaleessa 2.5.3 todettiin. Troxler-mittauksilla voidaan lähinnä vertailla sitä, miten tiiviyssasteet muuttuvat eri mittauspisteiden välillä.

Kantavuusmittausten osalta InfraRYL:n liitteessä koskien vaatimuksia suodatinkerroksessa käytettäville masuunikuonille, BOS-teräskuonaseoksille ja ferrokumikuonalle todetaan, että *”Materiaalin ominaisuuksista johtuen luonnonkiviaineksia vastaavan tiiveyssuhteen saavuttaminen voi olla hankalaa. Tämän ei ole havaittu heikentävän rakenteen ominaisuuksia. Kantavuusmittausten tekemistä suositellaan vasta 2...3 kk:n kuluttua rakentamisesta. Vaatimukset esitetään kuten luonnonkiviaineksilla.”* (InfraRYL 2018 21000, liite T1 2017). Myös haastateltu asiantuntija on sitä mieltä, että vaikka OKTO-eriste tiivistyy helposti, OKTO-eristettä sisältävistä rakenteista mitatut kantavuusmittaustulokset ovat olleet huonompi heti kantavan kerroksen tiivistämisen jälkeen kuin jonkin ajan kuluttua rakentamisesta (Mosorin 2018). Kokemusten mukaan kantavuusmittaukset OKTO-eristerakenteista tulisi tehdä mieluummin levykuormituskokeella kuin pudotuspainolaitteella (Mustaniemi 2017; Mosorin 2018).

OKTO-eriste läpäisee hyvin vettä, joten tiivistettäessä ylimääräinen vesi poistuu tiivistettävästä kerroksesta. Kastelua ei yleensä tiivistämisen aikana tarvita. (Kallio et al. 2010, s. 6) Lisäksi yleensä kohteeseen toimitetun OKTO-eristeen kosteuspitoisuus on ollut sopiva tiivistämiseen (Mosorin 2018). OKTO-eristeen vedenläpäisevyyskyky onkin niin suuri, että todennäköisesti rakennetta kasteltaessa vesi valuisi lähinnä pohjamaahan ja saattaisi aiheuttaa siellä ongelmia. Hienoaineksen puuttuessa ei OKTO-eristettä tarvitse kastella pölyämisenkään vuoksi.

Kuivatus

OKTO-eriste ei eroa kuivatusvaatimusten suhteen luonnonkivimateriaaleista. Aivan kuten luonnonmateriaaleillakin, myös OKTO-eristeen lämmönjohtavuus kasvaa vesipitoisuuden lisääntyessä. Kun OKTO-eristettä käytetään tie- tai katurakenteen suodatinkerroksessa sen lämmöneristävyys takia, tulee huolehtia rakenteen toimivasta kuivatuksesta. (Kallio et al. 2010, s. 14)

4.6 OKTO-eristeen kuormituskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä

Kappaleessa 2 käsitellyt karkearakeisen materiaalin palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen liittyvät tutkimukset on tehty luonnonkiviaineksille. Koska OKTO-eriste on karkearakeinen, sitoutumaton ja vain vähän vettä pidättävä materiaali, voidaan karkearakeisille luonnonkiviaineksille tehtyjen tutkimusten tuloksia tietyillä varauksilla yleistää koskemaan myös OKTO-eristeen muodonmuutoskäyttäytymistä.

OKTO-eristeen tyypillisen rakeisuuskäyrän (kuva 31) perusteella voidaan tarkastella OKTO-eristeen raekokosuhdetta (kaava 10). Raekokosuhteella kuvataan materiaalin seka- tai tasarakeisuutta. OKTO-eriste on tasarakeista, sillä sen tyypikkäyrän mukainen raekokosuhte on pienempi kuin viisi. OKTO-eristeessä ei käytännössä ole ollenkaan hienoainesta, joten tästä saattaa johtua, että OKTO-eriste ei tiivisty yhtä helposti kuin esimerkiksi sekarakeinen hiekka.

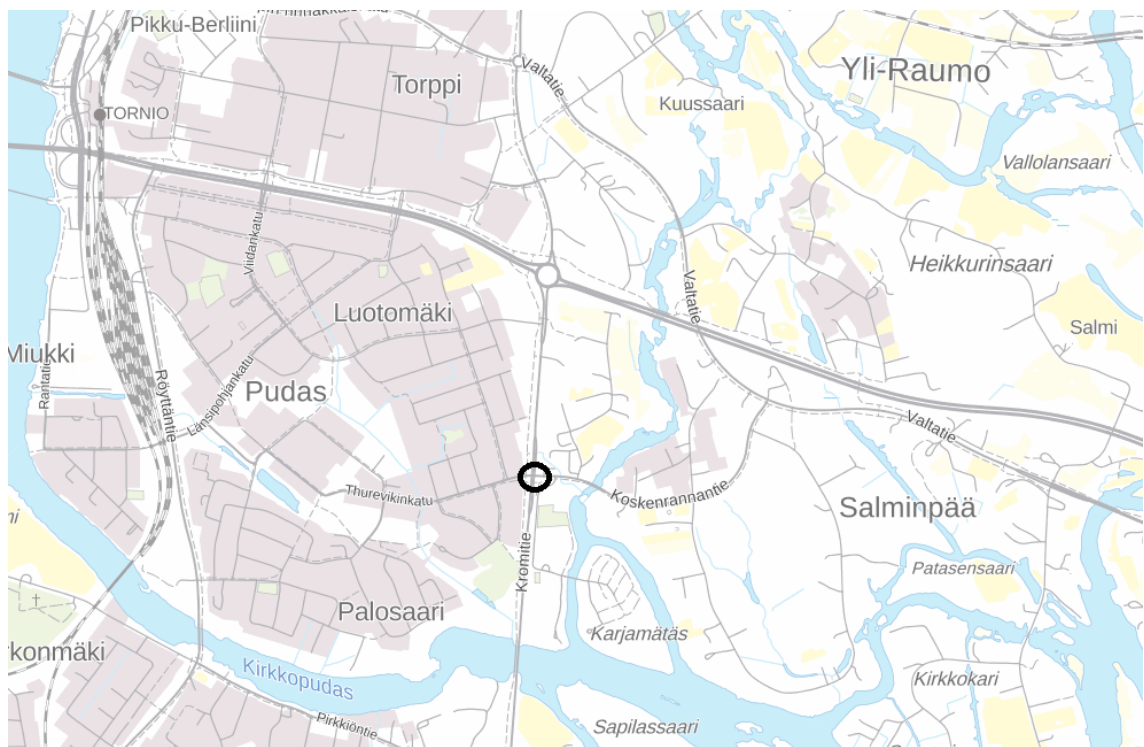
OKTO-eristeen rakeet ovat pinnaltaan melko karkeita ja särmikkäitä ja OKTO-eristeen leikkauskestävyyskulma on melko suuri. Karkearakeisen materiaalin lujuuteen vaikuttaa kaavan 15 mukaisesti myös leikkauskestävyyskulman suuruus. Karkearakeisen materiaalin lujuus taas vaikuttaa materiaalin kykyyn vastustaa palautumattomien muodonmuutosten syntymistä. Näin ollen voidaan olettaa, että hyvin tiivistetty OKTO-eriste pystyy vastustamaan palautumattomia muodonmuutoksia vähintään suodatinhiekan veroisesti.

5. KOERAKENTEET

Koerakenteet rakennettiin vertailupareittain Kromitien viereiselle jalankulku- ja pyörätielle Tornioon. Kahdessa koerakenteessa käytettiin suodatinkerroksessa hiekkaa (koerakenneosuudet HK1 ja HK2) ja kahdessa koerakenteessa OKTO-eristettä (koerakenneosuudet OKTO1 ja OKTO2). Yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen sekä päällysteen paksuus olivat kaikissa koerakenteissa sama.

5.1 Yleisesti koekohteesta

Koerakenteet rakennettiin osaksi ”Maantien 922 Kromitien parantaminen Thurevikinkadun ja Koskenrannantien liittymän kohdalla”-hanketta. Koekohde sijaitsee Kallioputaan kaupunginosassa Tornion kaupungissa (kuva 33). Hankkeen tilaaja on Lapin ELY-keskus. Kohteen rakentaminen tapahtui vuonna 2018.



Kuva 33. Koekohteen sijainti kartalla (Paikkatietoikkuna 2018).

Hankkeen alueella on tehtyjen tutkimusten mukaan noin 0,5...2,0 m paksuinen kuiva-kuorikerros, jonka alla on savista silttiä ja laihaa savea noin 3,0...6,0 m syvyyteen maanpinnasta. Siipikairausten perusteella savisen siltin ja laihan saven leikkauslujuus vaihtelee välillä 20...40 kPa. Pohjamaan on keskitiivistä tai tiivistä silttistä hiekkamoreenia. Pohjavedenpinnan taso alueella on noin 2,0 m syvyydellä maanpinnasta. Pohjaveden

pinnan alapuolella olevat siltti- ja savikerrokset ovat tutkimusten mukaan sulfidipitoisia. (Sivonen & Karjalainen 2017) Alueen maaperäolosuhteet näkyvät kuvassa 34. Hankaan alueella jouduttiin tekemään massanvaihtoja heikkojen pohjaolosuhteiden vuoksi.



Kuva 34. Suunnittelualan maaperäolosuhteet.

5.2 Koerakenteet

Koerakenteet sijoitettiin osaksi Kromitien vieressä kulkevaa jalankulku- ja pyörätietä, joka on rakennussuunnitelmassa J1-väylä. Kyseinen jalankulku- ja pyörätie rakennettiin uudelleen alikulun teon yhteydessä ja koerakenneosuuksien kohdalla on aikaisemmin ollut jalankulku- ja pyörätie. Kuvassa 35 on merkitty mustalla koerakenteiden sijainti kartalla.

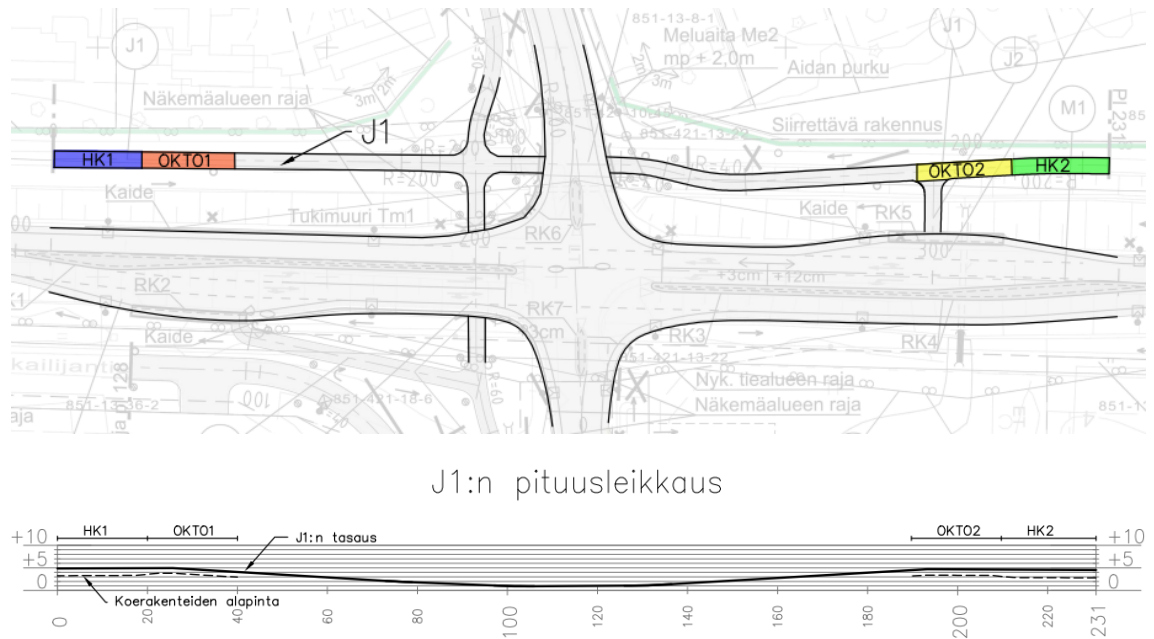


Kuva 35. Ortokuva, josta näkyy koerakenteiden sijainti (Paikkatietoikkuna 2018).

Koerakenneosuuksia tehtiin yhteensä neljä kappaletta. Jokaisen koerakenneosuuden pituus on noin 20 m eli yhteensä koerakenteita tehtiin 80 m. Kahdessa koerakenneosuudessa (HK1 ja HK2) käytettiin suodatinkerroksessa hiekkaa ja kahdessa koerakenneosuudessa (OKTO1 ja OKTO2) OKTO-eristettä.

5.2.1 Koerakenteiden sijoittaminen

Koerakenteet pyrittiin sijoittamaan J1-väylälle mahdollisimman samanlaisiin pohjaolosuhteisiin. Lisäksi koerakenneosuuksien sijoittamisessa huomioitiin esimerkiksi kuiva-utukseen liittyvät ja työtekniset seikat. Kuvassa 36 näkyy koerakenneosuuksien sijainti sekä kartalla että pituusleikkauksessa.



Kuva 36. Koerakenteiden sijainti kartalla ja J1-väylän pituusleikkauksessa (perustuu Turpeinen & Parantala 2017a; perustuu Turpeinen & Parantala 2017b).

Koerakenteiden kohdalta on tehty kaksi koekuoppaa. Koekuoppa 28 on tehty OKTO1-koerakennemuutoksen kohdalta (J1, paaluluku 35) ja koekuoppa 29 HK2-koerakennemuutoksen kohdalta (J1, paaluluku 220). Koekuoppien mukaan pohjamaa on savista silttiä, mutta aikaisempien tierakenteiden rakennepaksuudet eroavat eri koerakennemuutoksilla. Koekuoppatutkimusten tulokset koerakenteiden kohdalta on esitetty taulukoissa 14 ja 15.

Taulukko 14. Koekuoppatulokset OKTO1-osuuden kohdalta (Sivonen & Karjalainen 2017).

J1, koekuoppa 28	
Rakennekerrokset	Rakennekerrosten paksuus
Asfaltti	70 mm
Murske #0-32	530 mm
Hiekka	150 mm
Rakennekerrosten kokonaispaksuus	750 mm
Koekuopan syvyys	1100 mm
Pohjamaa: savinen siltti (saSi)	



Taulukko 15. Koekuoppatulokset HK2-osuuden kohdalta (Sivonen & Karjalainen 2017).

J1, koekuoppa 29	
Rakennekerrokset	Rakennekerrosten paksuus
Asfaltti	70 mm
Murske #0-32	530 mm
Hiekkainen sora	400 mm
Rakennekerrosten kokonaispaksuus	1000 mm
Koekuopan syvyys	1300 mm
Pohjamaa: savinen siltti (saSi)	



5.2.2 Koerakenteiden mitoitus

Koerakenteet mitoitettiin sekä kantavuuden että routanousun osalta. Rakennemitoitus tehtiin Väyläviraston (ent. Liikennevirasto) Tierakenteen suunnittelu (TIEH 2100029-04) -ohjeen mukaan. Kantavuusmitoituksessa käytettiin Odemarkin laskentakaavaa ja routamitoituksessa em. ohjeen laskennallisen routanousun kaavoja. Vaadittu kantavuus erilliselle pyörä- ja jalankulkutielle on päällysteen päältä 100 MPa ja kantavan kerroksen päältä 85 MPa. Sallittu laskennallinen routanousu on 70 mm.

Rakenteita mitoitettaessa lähtötietoina olivat koerakenteiden kohdilla tehdyt koekuoppatutkimukset, rakennussuunnitelman rakenteiden tyyppipoikkileikkaukset sekä työselostus. Oletuksena oli, että pohjamaa on molemmilla puolilla J1-väylää samankaltaista ja sen moduulina käytettiin koekuoppatutkimusten perusteella 20 MPa.

Koerakenteiden routanousumitoituksessa huomioitiin, miten ne liittyvät J1-väylän rakennussuunnitelman mukaisiin rakenteisiin ja risteäviin rakenteisiin. Routanousueroja koerakenteiden välillä tasattiin paksuuden muutoksella 5 m:n matkalla. Paksuuden muutos sijoittui 2,5 m molempien koerakenteiden puolelle. Muualla routanousueroja tasaamaan käytettiin 1:10 siirtymäkiilarakennetta.

Koerakenteissa vaihtelevat OKTO- ja hiekkakerrosten paksuudet. Yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen, profilointikerroksen sekä päällysteen paksuus ovat jokaisella koerakennemuodolla samat. Oletuksena työselostuksen perustella oli, että yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen murskeen mitoitusmoduuliarvona voidaan käyttää 280 MPa. Toimitetun hiekan rakeisuustutkimusten perusteella käytettiin hiekkakerrokselle mitoitusmoduuliarvoa 70 MPa. OKTO-eristeelle alkuperäisessä mitoituksessa käytettiin OKTO-eristeen suunnitteluohjeen mukaista mitoitusarvoa 100 MPa.

Koerakenteiden mitoitus sekä routanousun että tavoitekantavuuden suhteen on esitetty liitteessä A. Liitteessä B on esitetty tyyppipoikkileikkaukset jokaisesta koerakennetypistä. Alla olevassa taulukossa 16 on esitetty koerakenteiden mitoituksen tulokset.

Taulukko 16. Koerakenteiden kantavuus- ja routamitoituksen tulokset.

HK1			OKTO1		
Kerros	Paksuus (m)	E (MPa)	Kerros	Paksuus (m)	E (MPa)
Päällyste	0,04	2500	Päällyste	0,04	2500
Kantava + jakava	0,25	280	Kantava + jakava	0,25	280
Suodatinkerros	1,30	70	Suodatinkerros	0,85	100
Rakennekerrosten paksuus	1,59 m		Rakennekerrosten paksuus	1,14 m	
Kantavuus päällysteen päältä	164 MPa		Kantavuus päällysteen päältä	186 MPa	
Kantavuus kantavan kerroksen päältä	139 MPa		Kantavuus kantavan kerroksen päältä	159 MPa	
Laskennallinen routanousu	68 mm		Laskennallinen routanousu	55 mm	
OKTO2			HK2		
Kerros	Paksuus (m)	E (MPa)	Kerros	Paksuus (m)	E (MPa)
Päällyste	0,04	2500	Päällyste	0,04	2500
Kantava + jakava	0,25	280	Kantava + jakava	0,25	280
Suodatinkerros	1,00	100	Suodatinkerros	1,45	70
Rakennekerrosten paksuus	1,29 m		Rakennekerrosten paksuus	1,74 m	
Kantavuus päällysteen päältä	190 MPa		Kantavuus päällysteen päältä	164 MPa	
Kantavuus kantavan kerroksen päältä	163 MPa		Kantavuus kantavan kerroksen päältä	139 MPa	
Laskennallinen routanousu	28 mm		Laskennallinen routanousu	34 mm	

5.2.3 Koerakenteiden rakentaminen

Koerakenteita varten tehtiin koneohjausmalli, jonka avulla rakentaminen tehtiin. Kuvasta 37 näkyy OKTO1-koerakenneosuuden alku hyvin, sillä koerakenteiden ja muiden rakenteiden maalaatikkoratkaisu on erilainen.



Kuva 37. Koerakenteiden rakentaminen koneohjausmallin mukaan.

Alla olevissa kuvissa näkyvät rakentamisen aikana paljastuneet todelliset pohjaolosuhteet koerakenneosuuksilta. Kuvassa 38 näkyvät HK1- ja OKTO1-osuuksien pohjaolosuhteet ja kuvassa 39 OKTO2- ja HK2-osuuksien pohjaolosuhteet. Kuvat on otettu kaivutöiden jälkeen ennen koerakenneosuuksien rakentamista.



Kuva 38. Pohjaolosuhteet HK1- ja OKTO1-koerakenteiden kohdalla (J1, PL 0-40).



Kuva 39. Pohjaolosuhteet OKTO2- ja HK2-koerakenteiden kohdalla (J1, PL 190-231).

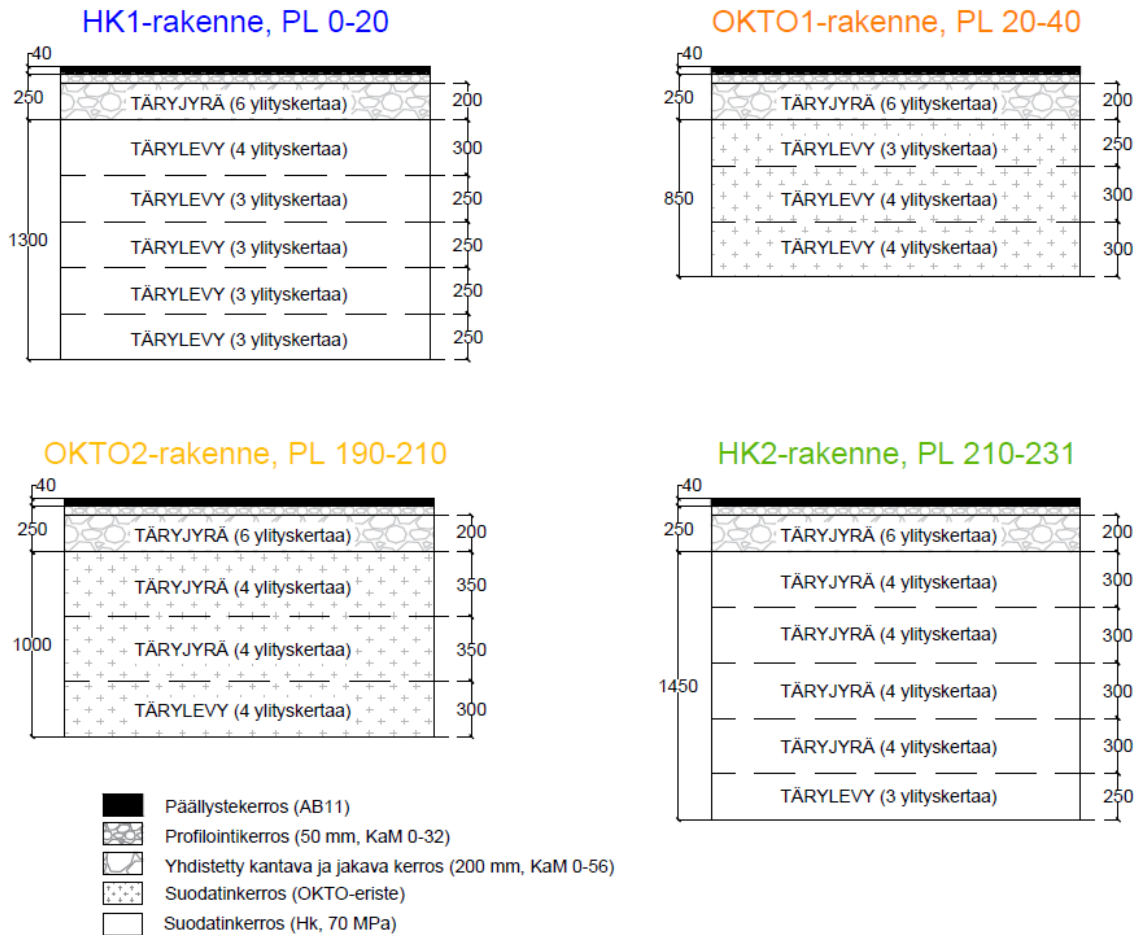
Kuten kuvista nähdään, pohjamaa J1:n alkupäässä (kuva 38) on selvästi savipitoisempaa kuin pohjamaa J1:n loppupäässä (kuva 39). Kaivutyöt J1:n alkupäässä tehtiin muutamaa päivää aiemmin ennen koerakenteiden rakentamista, kun taas kaivutyöt J1:n loppupäässä tehtiin juuri ennen koerakenteiden rakentamisen aloittamista. Kuvassa 39 näkyy pohjamaan lisäksi myös aiemman tierakenteen rakennusmateriaaleja. J1:n alkupäässä kaivettiin selvästi koekuoppa 28:n pohjan tasoa alemmaksi, joten siellä todellisen pohjamaana on työmaalla tehtyjen havaintojen perusteella savisen siltin sijaan laiha savi. Tarkkaa tietoa ei poiskaivetun kuivakuoren paksuudesta ole. Alikulun rakentamisen takia alueella alennettiin pohjavettä. Alkuperäinen pohjavedenpinnan raja näkyy kuvassa 38 ruskeana viivana ja saven pinta on halkeillut pohjaveden alenemisen vuoksi (nk. kuivumiskutistuma).

Koerakenteet rakennettiin ja tiivistettiin InfraRYL:n ja OKTO-eristeen suunnitteluohjeen mukaisesti rakenteiden kokonaispaksuudet huomioiden. Erot rakentamisolosuhteissa koerakenneosuuksien välillä on esitetty taulukossa 17. J1:n väylän rakentamisen vuoksi koerakenneosuuksilla HK1 ja OKTO2 tapahtui enemmän maarakennuskoneiden ylityksiä kuin koerakenneosuuksilla OKTO1 ja HK2. Erityisesti OKTO1- ja HK2-rakenteiden loppupäässä maarakennuskoneiden ylityksiä tapahtui vähän, koska rakentaminen alkoi rakenteiden alkupäästä. Rakentamisessa käytettiin kaikilla koerakenneosuuksilla myös pyöräkuormaajaa. Tela-alustainen kaivukone teki vähemmän ylityksiä HK1- ja OKTO1-koerakenneosuuksien yli kuin pyöräalustainen kaivukone OKTO2- ja HK2-koerakenneosuuksien yli. Ero johtui koerakenneosuuksien sijainnista. Koerakenneosuudet OKTO2 ja HK2 sijaitsivat siten, että kevyen liikenteen kulku tuli mahdollistaa koerakenneosuuksien vierestä myös rakentamisen aikana, kun taas koerakenneosuuksia HK1 ja OKTO2 pystyi tekemään ilman tällaista vaatimusta.

Taulukko 17. Erot rakentamisolosuhteissa koerakenneosuuksien välillä.

Koerakenne- osuus	HK1	OKTO1	OKTO2	HK2
Kaivutöiden ajankohta	Kaivutyöt tehty noin päivää en- nen rakentami- sen aloittamista	Kaivutyöt tehty noin kaksi päi- vää ennen ra- kentamisen aloittamista	Kaivutyöt tehty juuri ennen ra- kentamisen aloittamista	Kaivutyöt tehty juuri ennen ra- kentamisen aloittamista
Rakentamiseen (pääosin) käy- tetty työkone	Tela-alustainen kaivukone	Tela-alustainen kaivukone	Pyöräalustainen kaivukone	Pyöräalustainen kaivukone
Tiivistysmene- telmä	Kaikki kerrokset tärylevy (416 kg)	Kaikki kerrokset tärylevy (416 kg)	1. kerros täry- levy (416 kg) Loput kerrokset 1-valssinen täry- jyrä (12,5 t)	1. kerros täry- levy (416 kg) Loput kerrokset 1-valssinen täry- jyrä (12,5 t)
Maarakennus- koneiden yli- tysten lkm ra- kentamisen ai- kana / jälkeen	Paljon ylityksiä (erityisesti pyö- räkuormaaja)	Vähemmän yli- tyksiä	Paljon ylityksiä (pyöräkuor- maaja sekä pyö- räalustainen kai- vukone)	Vähemmän yli- tyksiä

Työmaan tilanteen vuoksi tiivistysmenetelmät olivat kuitenkin erilaiset eri päissä J1-väylää. Vierekkäiset koerakenteet (HK1 ja OKTO1 sekä HK2 ja OKTO2) tiivistettiin samantaisilla menetelmillä. Tiivistysmäärät, kerrospaksuudet ja tiivistyskerrat on esitetty tarkemmin kuvassa 40. Kerrospaksuudet on esitetty kuvien vasemmassa reunassa ja tiivistyskerrosten paksuudet oikeassa reunassa.



Kuva 40. Koerakenneosuuksien kerros- ja tiivistyspaksuudet sekä tiivistysmenetelmät.

Työmaalla käytetyn hiekan ja OKTO-eristeen rakeisuudet on esitetty liitteessä C. Hiekan rakeisuuskäyrän perusteella määräytyvät E-moduulit vaihtelivat 50...70 MPa:n välillä. Murskeena kohteessa käytettiin KaM 0-56 ja KaM 0-32, joiden rakeisuusluokka suoritustasoilmoituksen mukaan on G_{A85} . Näin luokitellussa kalliomurskeessa on kiven laadusta johtuen murskattaessa enemmän hiekkarakeita kuin esimerkiksi G_0 -rakeisuusluokkaan kuuluvissa kalliomurskeissa. Tällöin Liikenneviraston Tierakenteen suunnittelu-ohjeen mukaan voidaan E-moduulina Odemark-mitoituksessa käyttää molemmille murskeille 200 MPa (Liikennevirasto 2018, s. 46). Murskeiden suoritustasoilmoitukset on esitetty liitteessä C.

Kuvassa 41 näkyy koerakenteissa käytettyä hiekkaa. Vertailuhiekka oli selvästi ensimmäisissä kuormissa karkeampaa ja kivisempää kuin loppupuolen kuormissa. Kivet pyrittiin seulomaan pois seulakauhalla. HK2-osuus rakennettiin loppupuolen kuormissa tulleet hienorakeisemmasta hiekasta, jota oli kasojen päällimmäisenä. HK1-osuus raken-

nettiin HK2-osuuden jälkeen karkearakeisemmasta hiekasta. Kuvassa 42 näkyy koerakenteissa käytettyä OKTO-eristettä. OKTO-eriste on varhaisena aamuna ilmaa lämpimämpää ja höyryä sen takia.



Kuva 41. Koerakenteissa käytettyä hiekkaa.



Kuva 42. Koerakenteissa käytettyä OKTO-eristettä.

5.3 Havaintoja OKTO-eristeen rakennettavuudesta

Työmaalla rakentamisen yhteydessä tehtyjen havaintojen ja haastattelujen tulokset on koottu tähän kappaleeseen. Oulun ja Tornion seudulla on käytetty OKTO-eristettä rakentamisessa jo vuosikymmeniä, joten työmaalla oli kokemuksia myös ennen CE-merkintää valmistetun OKTO-eristeen käytöstä. Tällöin OKTO-eristeen laadussa oli kokemusten mukaan enemmän vaihtelua ja esimerkiksi tiivistäminen koettiin vaikeammaksi kuin nykyään.

OKTO-eristeen tiivistäminen ja tiivistyminen olivat muutenkin yleisimpiä OKTO-eristeen käyttöön liittyviä puheenaiheita. Työmaalla koettiin, että OKTO-eristeen tiivistämiseen liittyvä ohjeistus ei ole kovinkaan selkeää ja esimerkiksi kerralla tiivistettävät kerrospaksuudet voivat vaihdella eri rakennussuunnitelmissa. OKTO-eristeen suunnitteluohjeessa mainitaan, että kerralla tiivistettävän OKTO-eristekerroksen paksuus saa olla maksimissaan 500 mm ja että yleensä OKTO-eriste tiivistetään 200...400 mm kerroksissa (Kallio et al. 2010, s. 7, 18). Ohjeelliset tiivistysmäärät näkyvät taulukossa 10, mutta ohjeessa ei oteta kantaa esimerkiksi siihen olisiko dynaaminen vai staattinen tiivistysmenetelmä OKTO-eristeelle parempi tai millä teholla täryjyrää käytetään.

Työmaalla käydyissä keskusteluissa OKTO-eristettä verrattiin usein hiekkaan ja mietittiin, että voisivatko samat työtavat sopia OKTO-eristeelle kuin hiekalle. Tässä luultavasti vaikuttaa myös OKTO-eristeen tyyppilinen sijainti tierakenteen suodatinkerroksessa. Suurimpina eroina tiivistämisen kannalta pidettiin sitä, että OKTO-eristeestä kuitenkin puuttuu lähes kokonaan hienoaaines ja rakeen muoto on erilainen kuin hiekalla.

Työmaalla tehtiin eri koerakenneosuuksilla OKTO-eristeen tiivistäminen eri tavoilla. Kuvassa 43 näkyy tiivistämisjälki tärylevyllä tiivistämisen jälkeen. Kuvassa 44 näkyy, miten rakennekerroksen pinta käyttäytyi täryjyrän lähestyessä ja kuvassa 45 rakennekerroksen pinta täryjyrällä tiivistämisen jälkeen.



Kuva 43. Tiivistämislähti tärvellevyllä tiivistämisen jälkeen.



Kuva 44. Rakennekerroksen pinta tärvellevyllä tiivistämisen jälkeen.



Kuva 45. Tiivistämislähti tärvellevyllä tiivistämisen jälkeen.

Työmaalla oli muutama henkilö, jotka kokivat, että tärylevyllä tiivistettäessä OKTO-eriste tiivistyi myös pinnasta paremmin kuin esimerkiksi jyrällä tiivistettäessä, koska täryjyrä jätti OKTO-eristeen pinnan irtonaisemmaksi. Täryjyrän työskentelyteholla oli myös havaittu olevan vaikutusta siihen, miten OKTO-eristeen pinta käyttäytyi. Staattisia tiivistysmenetelmiä oli heidän kokemuksensa mukaan käytetty harvemmin OKTO-eristeen tiivistämiseen kuin dynaamisia tiivistysmenetelmiä.

Suunnitteluohjeen mukaan OKTO-eristeen päällä voidaan liikennöidä heti tiivistämisen jälkeen. On kuitenkin huomattava, että tiivistämisen jälkeen pintakerros jää edelleen selvästi löyhemmäksi ja raskaammasta työkoneesta jää rakenteeseen huomattavat jäljet. Kuvassa 46 on pyöräalustaisen kaivukoneen ja kuvassa 47 pyöräkuormaajan jättämät jäljet OKTO-eristeen pinnassa. Pyöräalustaisen kaivukoneen kulkemisen jälkeen OKTO-eristeen pinta tiivistettiin uudelleen.



Kuva 46. Pyöräalustaisen kaivukoneen jättämät jäljet tiivistetyn OKTO-eristeen pinnalla.



Kuva 47. Pyöräkuormaajan jättämät jäljet tiivistetyn OKTO-eristeen pinnalla.

5.4 Mittaukset koerakenteista

Koerakenteista tehtiin tiiviysmittauksia sekä hiekkavolymetrilla että Troxlerilla. Lisäksi hiekasta ja OKTO-eristeestä määritettiin maksimikuivairtoteiheyden parannetulla Proctor-sullonnalla. Koerakenteista tehtiin kantavuusmittauksia levykuormituskokeella ja pudotuspainolaitteella. Tehdyt mittaukset on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. *Rakennekerroksista tehdyt mittaukset.*

Rakennekerros, jonka päältä mit- taus tehtiin	Mittausmenetelmä			
	Hiekkavo- lymetri	Troxler	Levykuormitus- koe	Pudotuspaino- laitemittaus
Suodatinkerros	X	X	X	
Yhdistetty kantava ja jakava kerros			X	X

Koerakenteiden mittauspisteiden valintaan ovat vaikuttaneet työmaaolosuhteet (kuten muiden osuuksien rakentaminen) ja esimerkiksi siirtymäkiilojen sijainnit. Mittauksia ei tehty siirtymäkiilarakenteiden päältä. Kantavan kerroksen päältä tehdyt levykuormitus- ja pudotuspainolaitemittaukset on tehty noin metrin etäisyydeltä toisistaan tietyn paaluvun ympäriltä. Mittaukset on pyritty tekemään keskeltä poikkileikkausta. Alla on esitetty tutkimusten tuloksia mittausmenetelmittäin ja liitteissä on esitetty tarkemmat mittaustulokset.

5.4.1 Tiiviysmittausten tulokset

Hiekasta ja OKTO-eristeestä tehtiin kummastakin kaksi parannettua Proctor-sullontaa maksimikuivairtoteiheyden määrittämiseksi. Proctor-sullonnalla määritetyt maksimikuivairtoteiheydet sekä optimivesipitoisuudet on esitetty taulukossa 19 ja liitteessä D.

Taulukko 19. *Parannetun Proctor-sullonnan tulokset.*

Materiaali	Maksimikuivairtoteiheyden (kg/m ³)	Optimivesipitoisuus (%)
Hiekka	1790	7,1
Hiekka	1780	7,2
Keskiarvo	1785	7,2
OKTO-eriste	1749	6,9
OKTO-eriste	1751	6,9
Keskiarvo	1750	6,9

Troxler- ja hiekkavolymetrimittaukset tehtiin valmiista suodatinkerroksesta. Koerakenteiden tiivysasteet on määritetty vertaamalla Troxler-mittauksilla ja hiekkavolymetrimittauksilla saatua kuivartotiheyttä Proctor-sullonnalla saatuun maksimikuivartotiheyteen. Hiekkavolymetrikokeiden tulokset on esitetty liitteessä E. Kuivartotiheyden ja vesipitoisuuden keskiarvot koerakenneosuuksittain on esitetty taulukossa 20. Kuvassa 48 on esitetty tuloksista saatujen tiivysasteiden vaihtelu koerakenneosuuksittain.

Taulukko 20. *Hiekkavolymetrimittautulosten keskiarvot koerakenneosuuksittain.*

	Kuivartotiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)
HK1	1724	2,0
OKTO1	1682	4,8
OKTO2	1635	4,5
HK2	1714	2,3



Kuva 48. *Hiekkavolymetrikokeista saadut tiivysasteet koerakenneosuuksittain.*

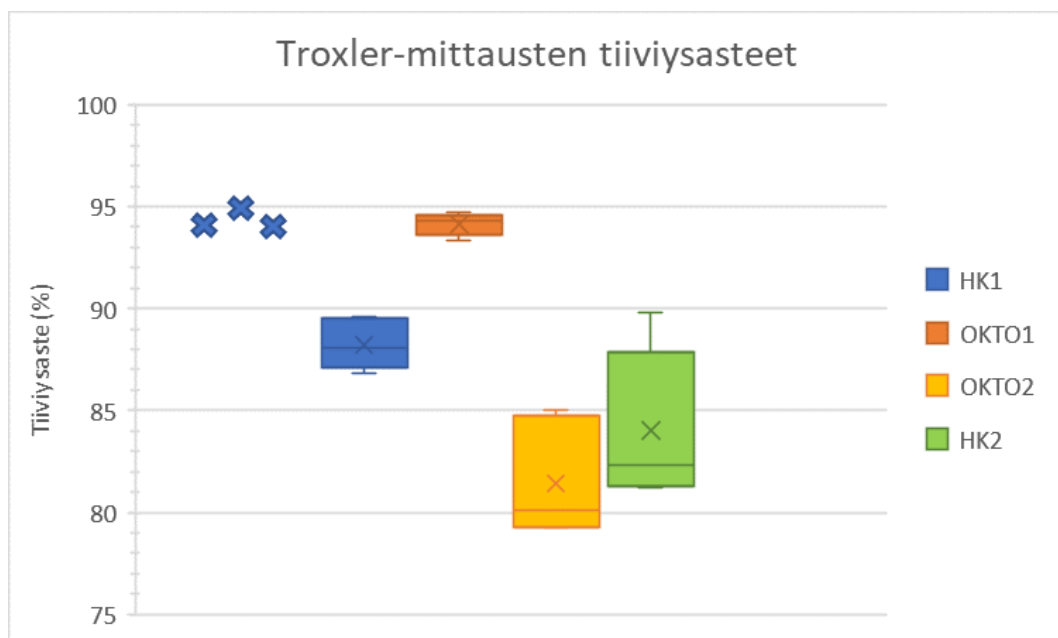
Troxler-mittaukset tehtiin 200 mm:n syvyydestä suodatin- ja eristekerroksen pinnasta. Troxler-mittaukset tehtiin HK1-rakenteesta vuorokautta aiemmin kuin hiekkavolymetrikokeet. Muista koerakenneosuuksista Troxler- ja hiekkavolymetrimittaukset on otettu peräkkäin. Troxler- ja hiekkavolymetrimittautusten välillä HK1-osuudella tapahtui työmaaliikennettä OKTO1-osuuden rakentamisen takia ja HK1-osuuden suodatinkerroksen pinta tiivistettiin vielä kerran työmaaliikenteen jäljiltä ennen hiekkavolymetrimittautusten tekoa ja

yhdistetyn kantavan ja jakavan kerroksen rakentamista. Tämä on voinut vaikuttaa huomattavaan eroon tiiviysasteissa eri menetelmien välillä HK1-osuudella. HK1-osuudelta tehtiin kolme uusintamittausta Troxlerilla hiekkavolyttrimittausten yhteydessä. Troxler-mittauksista on poistettu OKTO1-osuudelta yhden mittauspisteen tulos, joka vääristi tiiviysasteen jakaumaa huomattavasti.

Troxler-mittausten tulokset on esitetty liitteessä F. Kuivairtitiheyden ja vesipitoisuuden keskiarvot koerakenneosuuksittain on esitetty taulukossa 21. Näissä keskiarvoissa ei ole huomioitu uusintamittausten tuloksia. Tuloksista lasketut tiiviysasteet koerakenneosuuksittain on esitetty kuvassa 49. Kuvaan on merkitty rasteilla HK1-osuudelta tehtyjen uusintamittausten tulokset.

Taulukko 21. *Troxler-mittaustulosten keskiarvot koerakenneosuuksittain.*

	Kuivairtitiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)
HK1	1583	2,5
OKTO1	1647	2,5
OKTO2	1425	3,4
HK2	1508	2,1



Kuva 49. *Troxler-mittausten tiiviysasteet.*

Koerakenneosuuksien ylimmät tiivistetyt kerrokset olivat paksuudeltaan 250...350 mm paksuisia. Troxler-mittaukset tehtiin 200 mm syvyydestä, joten tiivistetyn kerroksen pak-

suudesta riippuen mittauspiste on osunut tiivistettävän kerroksen alareunaan. Hiekkavolymetrikokeita varten kaivetut kuopat olivat syvyydeltään noin 100...150 mm, joten tällä menetelmällä saadut tulokset kuvaavat rakennekerroksen tiiviyyttä lähempänä tiivistettävän kerroksen pintaa kuin Troxler-mittauksella saadut tulokset. Mittauspisteiden syvyys-erot eri mittausmenetelmien välillä ovat voineet osaltaan vaikuttaa siihen, että samoilla koerakenneseoksilla hiekkavolymetrikokeilla on saatu korkeampia tiiviyssasteita kuin Troxler-mittauksilla. Hiekkavolymetrikokeiden tulosten mukaan myöskään tiiviyserot eri koerakenneseoksien välillä eivät ole niin suuret kuin Troxler-mittausten perusteella. Mittauksia ei kuitenkaan ole tehty aivan samoista pisteistä ja tietyn tiiviyssmittauksen tulos kuvaa vain kyseisen mittauspisteen tiiviyyttä.

HK1-osuudella saatujen mittaustulosten perusteella rakenne on tiivistynyt lisää koerakenneseisuuden yli tapahtuneen liikennöinnin seurauksena. Troxlerilla tehtyjen uusinta-mittausten tulokset ovat samaa luokkaa osuudelta tehtyjen hiekkavolymetrimittausten tulosten kanssa.

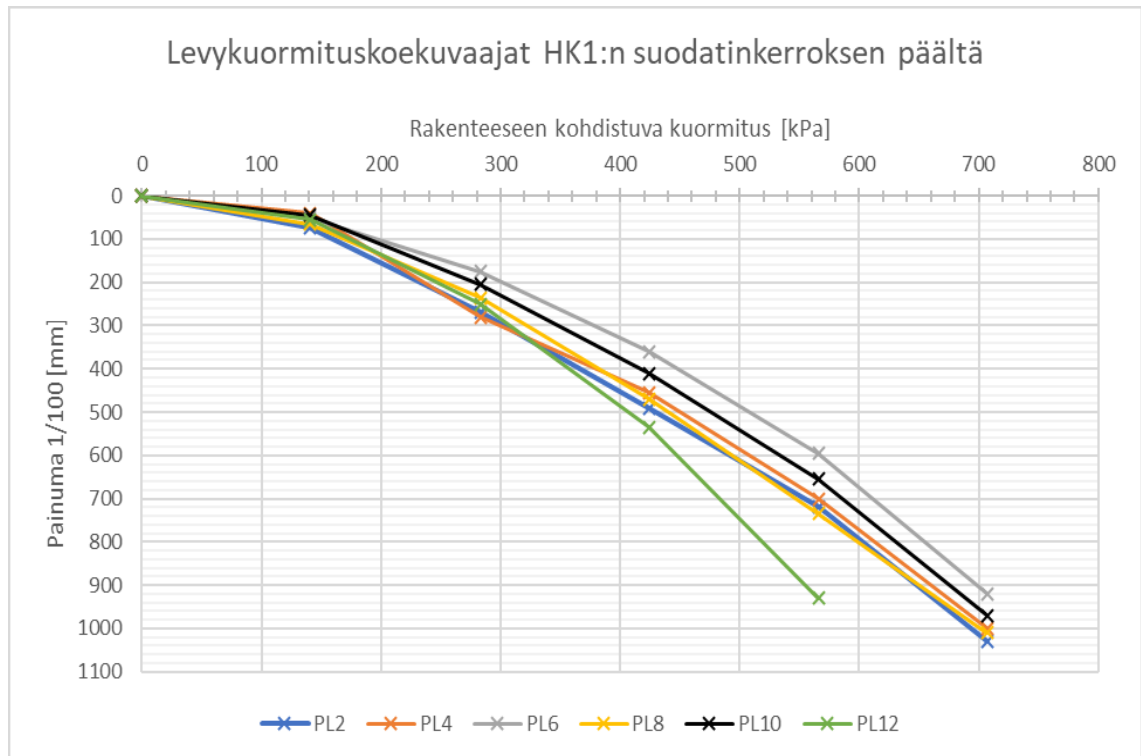
Troxler-mittaukset eivät välttämättä sovellu OKTO-eristeelle sen hiekasta poikkeavan mineralogian vuoksi, kuten kappaleessa 2.5.3 mainittiin. Tämän vuoksi Troxlerilla mitatut tiiveysasteet kertovat erityisesti OKTO-eristeen osalta suhteellisesta muutoksesta eri mittausten välillä, eivät niinkään varsinaisesta kuivairtoteiheyden ja maksimikuivairtoteiheyden todellisesta suhteesta.

5.4.2 Levykuormituskokeiden tulokset

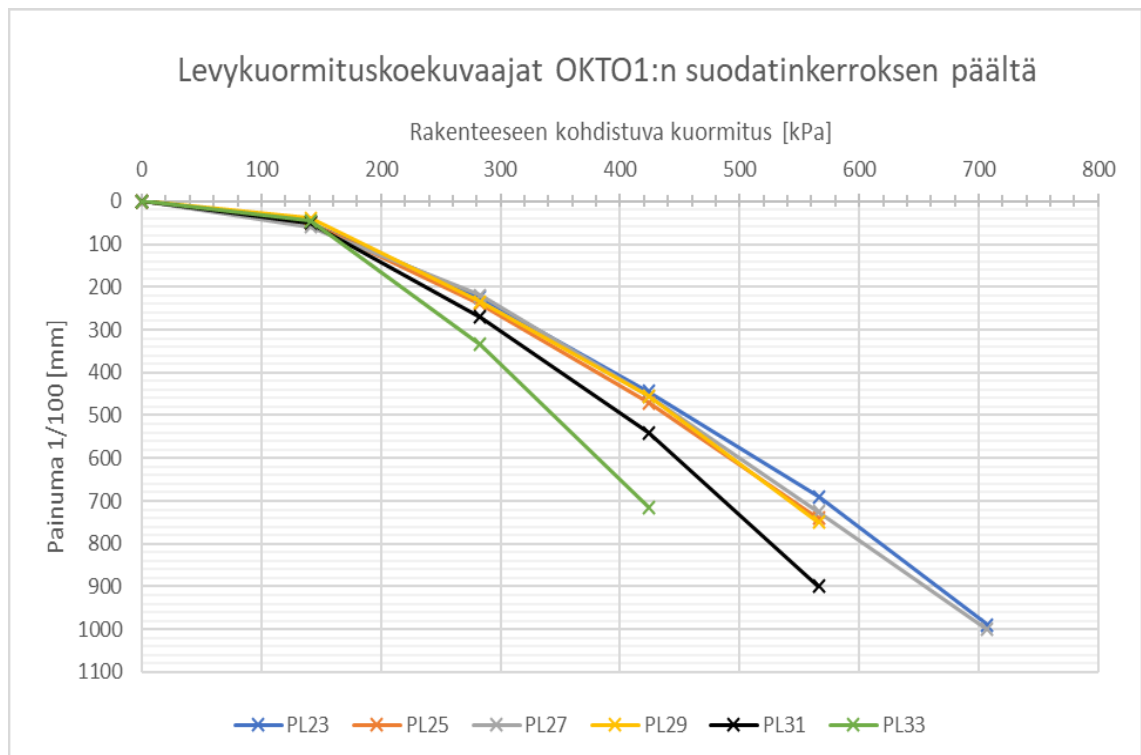
Suodatinkerrosten päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset

Ensimmäiset levykuormitusmittaukset tehtiin valmiiden suodatinkerrosten pinnalta. Mittauspäivänä sää oli aurinkoinen eikä mittauksia edeltävinä päivinä ei ollut juurikaan sataanut.

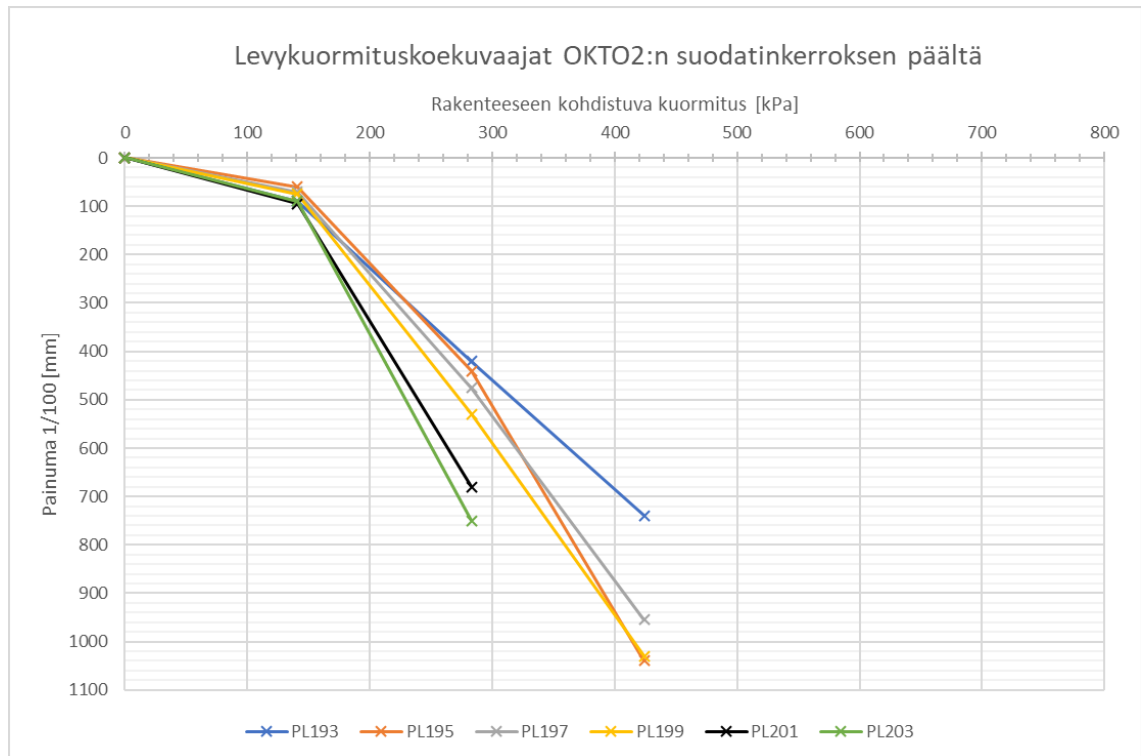
Suodatinkerrosten pinnalta tehdyt levykuormituskokeet keskeytyivät, sillä rakenne levyn alla painui yli 10 mm ennen kuin päästiin 60 kN:n maksimikuormitukseen asti. Mittaustuloksia saatiin siis vain ensimmäiseltä kuormituskerralta. Levykuormituskokeiden tulokset on esitetty liitteessä G. Kuvissa 50-53 on esitetty mittausten kuormitus-painuma-kuvaukset koerakennetyypeittäin.



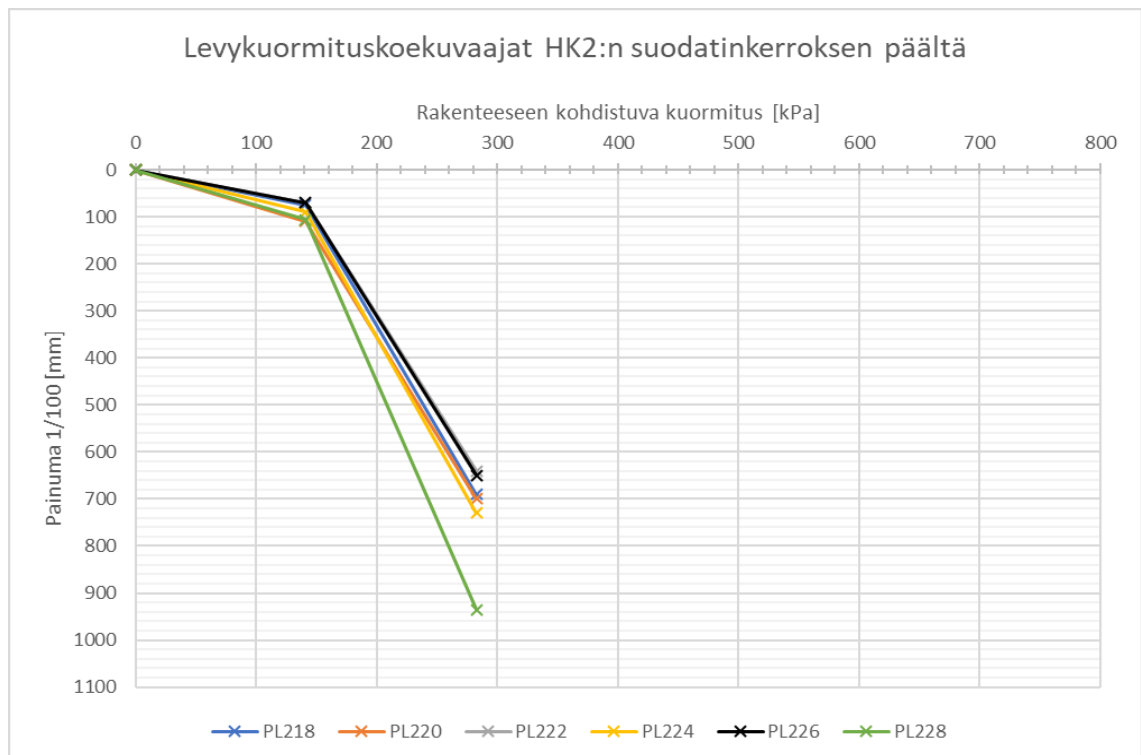
Kuva 50. HK1-osuuden kuormitus-painuma-kuvaajat.



Kuva 51. OKTO1-osuuden kuormitus-painuma-kuvaajat.



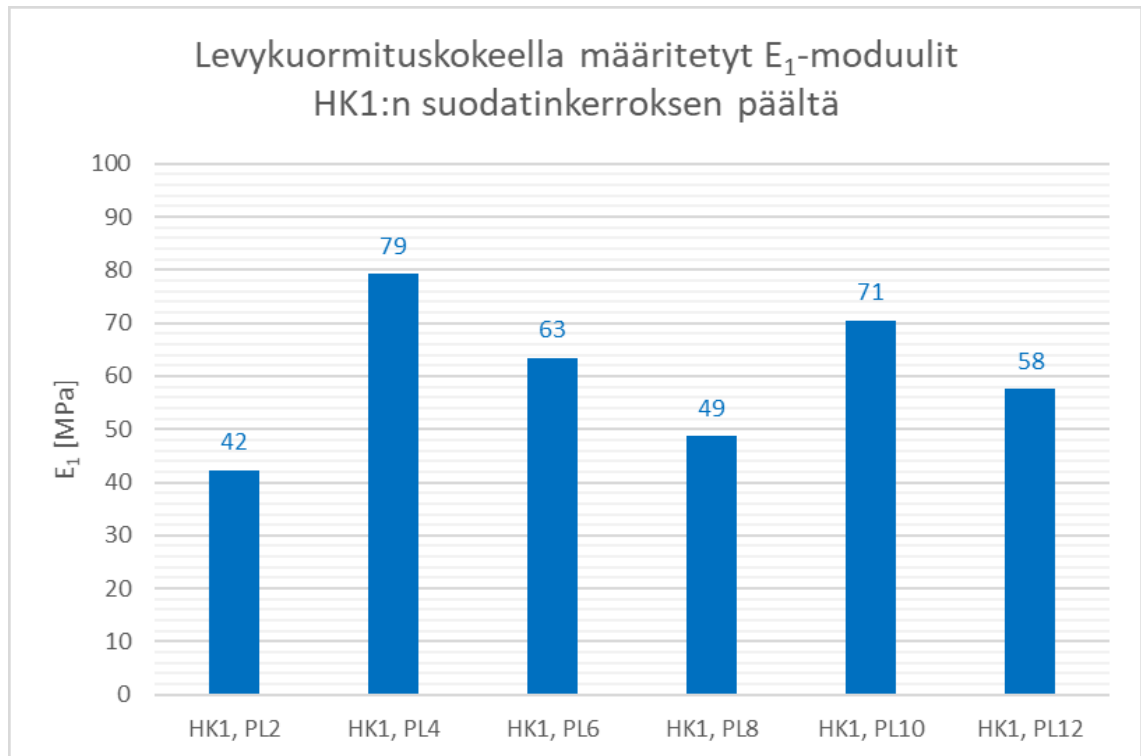
Kuva 52. OKTO2-osuuden levykuormituskokeen tulokset.



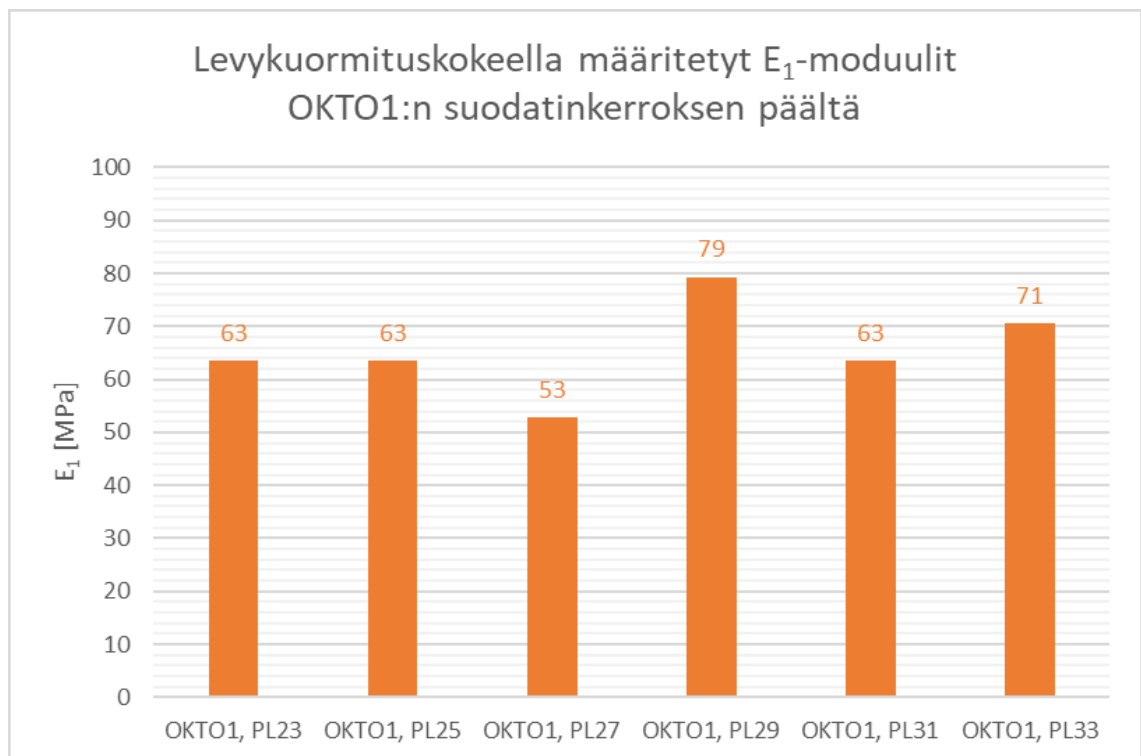
Kuva 53. HK2-osuuden levykuormituskokeen tulokset.

Levykuormituskoekuvaajista voidaan havaita, että koerakenneosuuksilla HK1 ja OKTO1 rakenne painui vähemmän kuin koerakenneosuuksilla HK2 ja OKTO2. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että koerakenneosuuksilla HK1 ja OKTO1 suodatinkerrokset ovat tiivistyneet paremmin kuin koerakenneosuuksilla HK2 ja OKTO2. Myös eroilla pohjamaassa sekä tiivistysmenetelmissä voi olla vaikutusta saatuihin tuloksiin, sillä koerakenneosuuksien HK2 ja OKTO2 alla oleva silttinen pohjamaa on voinut häiriintyä täryjyryksen seurauksena.

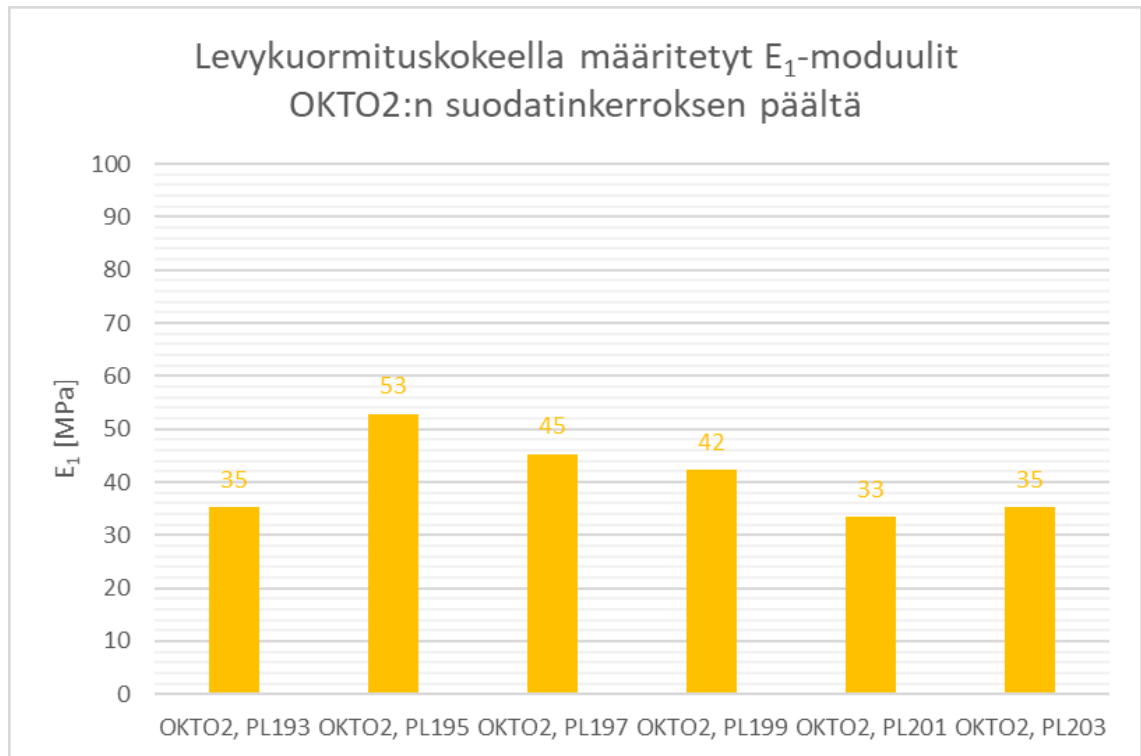
Koska tierakenteessa suodatinkerrokseen ei kohdistu normaalissa käyttötilanteessa suuria kuormituksia, voidaan koerakenneosuuksille laskea todellista kuormitustilannetta lähinnä vastaavat E_1 -moduulit ensimmäiseltä kuormitusväliltä, jossa maksimikuormitus on 140 kPa. Kuvissa 54-57 on esitetty näin lasketut E_1 -moduulit mittauspisteittäin.



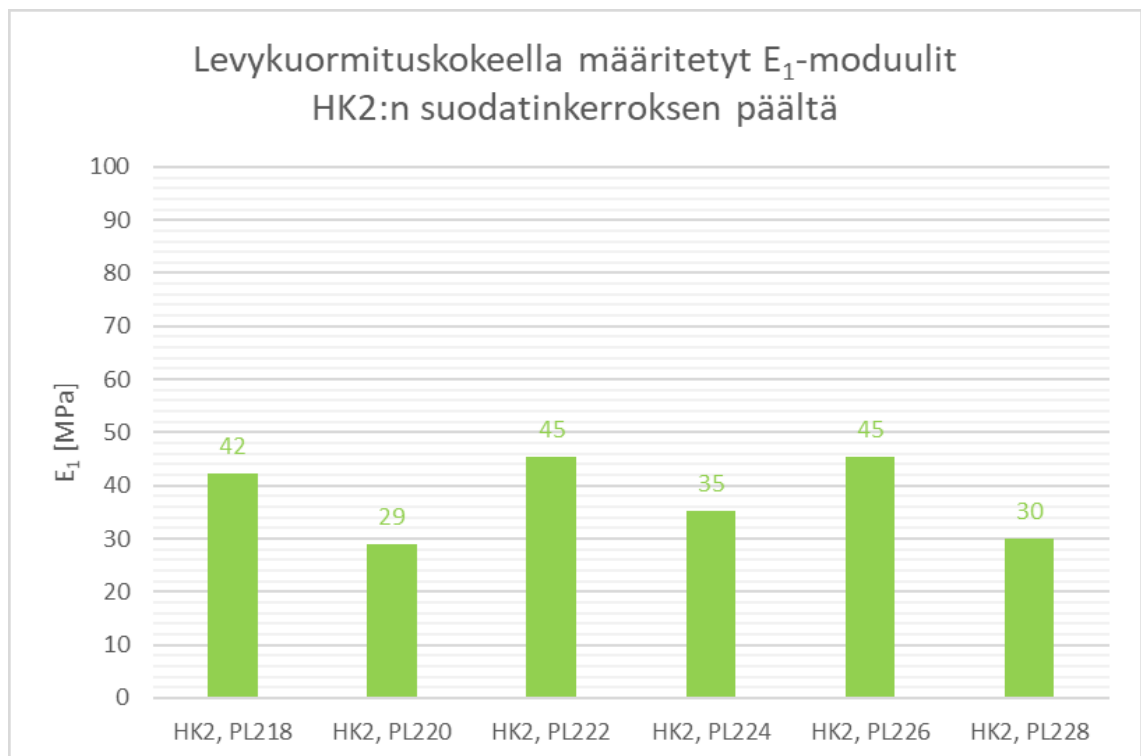
Kuva 54. HK1:n suodatinkerroksen päältä levykuormituskokeella määritetyt E_1 -moduulit.



Kuva 55. OKTO1:n suodatinkerroksen päältä levykuormituskokeella määritetyt E_1 -moduulit.



Kuva 56. OKTO2:n suodatinkerroksen päältä levykuormituskokeella määritetyt E_1 -moduulit.



Kuva 57. HK2:n suodatinkerroksen päältä levykuormituskokeella määritetyt E_1 -moduulit.

Vaikka levykuormituskokeet keskeytyivät ja tuloksista saatiin laskettua vain ensimmäistä kuormitusporrasta vastaavat E_1 -moduulit, voidaan niiden perusteella arvioida koerakenneosuuksien suodatin- ja eristekerrosten tiivistymistä. E_1 -moduuli kertoo siitä, kuinka paljon tietty rakenteeseen kohdistuva kuormitus pystyy tiivistämään rakennetta eli kuinka paljon muodonmuutoksia rakenteessa kyseinen kuormitus aiheuttaa. Muodonmuutokset ovat tällöin sekä pysyviä että palautuvia. Kuten tuloksista nähdään, J1:n alkupäässä HK1- ja OKTO1-koerakenneosuuksien kohdalla kuormituksen aiheuttamat painumat ovat paljon pienempiä kuin J1:n loppupäässä OKTO2- ja HK2-koerakenneosuuksien kohdalla. Näin ollen HK1- ja OKTO1-koerakenneosuuksien kohdalla rakennekerrokset pystyvät vastustamaan muodonmuutoksia paremmin kuin OKTO2- ja HK2-koerakenneosuuksien materiaalit. Todennäköisesti tiivistys on onnistunut HK1- ja OKTO1-osuuksilla paremmin.

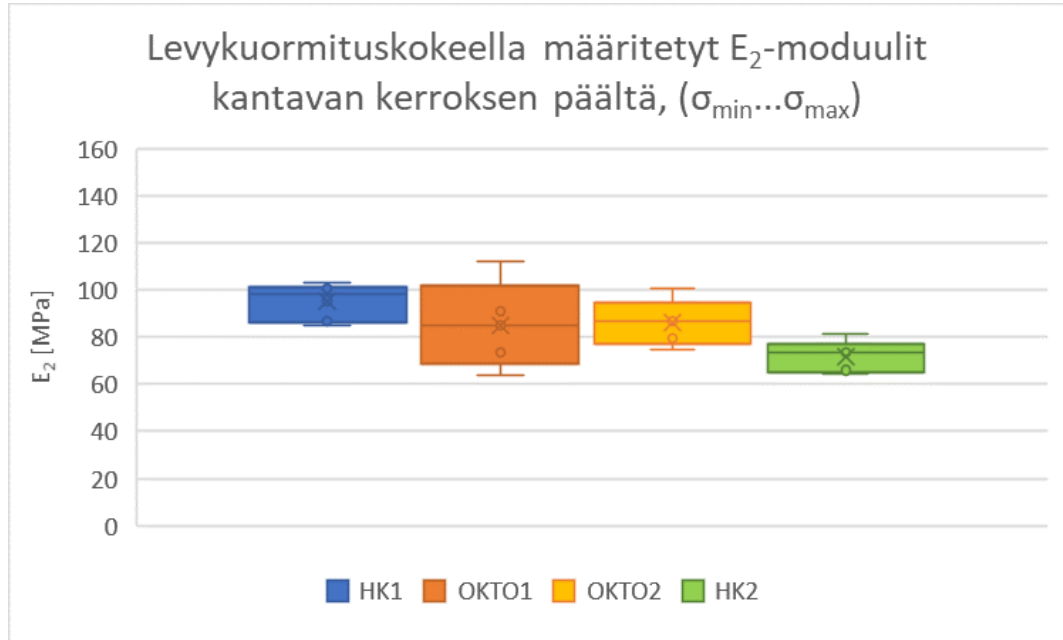
Kantavan kerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset

Levykuormituskokeet tehtiin valmiin, tiivistetyn kantavan kerroksen päältä ennen profiointikerroksen tekemistä. Levykuormituskokeista oli mittausyrityksen toimesta laskettu E-moduulit suurimman kuormituksen ja suurimman painuman perusteella. InfraRYL edellyttää laskemaan E-moduulit 30...70% jännitysväliltä maksimijännityksestä ja tätä vastaavalta painumaväliltä. Mittaustulokset on esitetty liitteessä H. Taulukossa 22 on esitetty molemmilla tavoilla lasketut E-moduulit. Taulukossa on yliviiivattu ne mittauspisteet, joissa on kuvaajien muodon perusteella tapahtunut mittauksen aikana jokin mittaus-tekniinen virhe ja joita ei ole otettu mukaan mittaustulosten jatkokäsittelyyn.

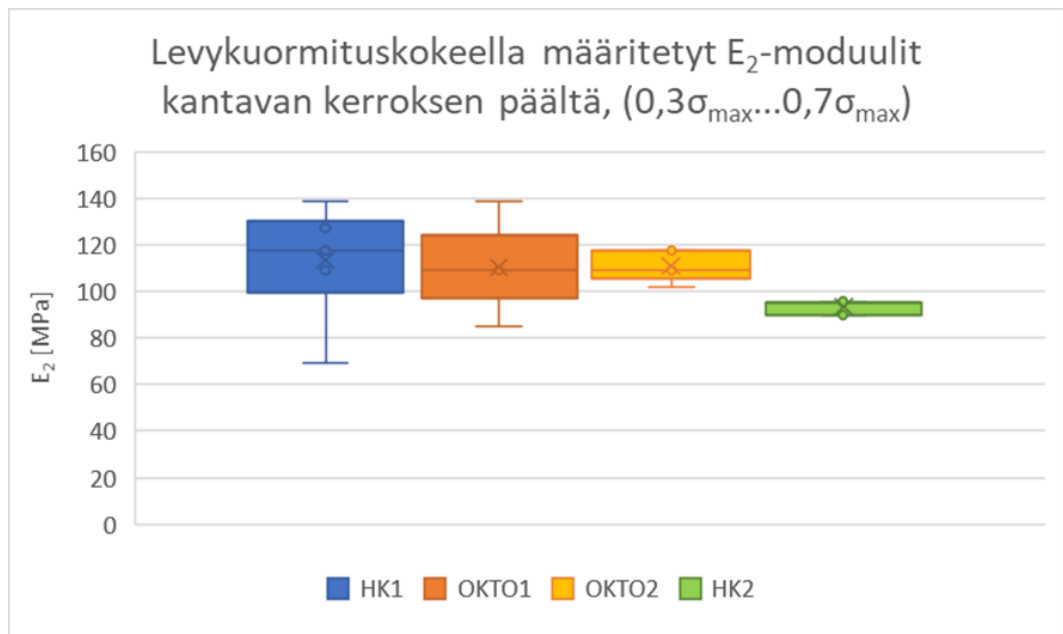
Taulukko 22. Levykuormituskokeiden tuloksista määritetyt E-moduulit koerakennosuuksien kantavien kerroksien päältä.

	$\sigma_{\min} \dots \sigma_{\max}$			$0,3\sigma_{\max} \dots 0,7\sigma_{\max}$		
Mittauspiste	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₁ /E ₂	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₁ /E ₂
HK1, PL2	47,2	84,9	1,8	43,7	109,2	2,5
HK1, PL4	57,9	86,8	1,5	63,7	117,6	1,8
HK1, PL6	63,7	100,5	1,6	61,1	127,4	2,1
HK1, PL8	61,6	100,5	1,6	37,3	69,5	1,9
HK1, PL10	62,6	95,5	1,5	72,8	117,6	1,6
HK1, PL12	59,7	103,2	1,7	69,5	138,9	2,0
KESKIARVO	58,8	95,2	1,6	58,0	113,3	2,0
OKTO1, PL23	97,2	112,3	1,1	127,4	138,9	1,1
OKTO1, PL25	58,8	63,7	1,1	—	—	—
OKTO1, PL27	48,4	90,9	1,9	52,7	109,2	2,1
OKTO1, PL29	45,5	84,9	1,9	47,8	109,2	2,3
OKTO1, PL31	41,5	63,7	1,5	41,3	84,9	2,1
OKTO1, PL33	37,4	73,5	2,0	43,7	109,2	2,5
KESKIARVO	57,1	90,4	1,6	67,9	116,6	1,7
OKTO2, PL193	30,8	74,9	2,4	27,3	101,9	3,7
OKTO2, PL195	36,0	100,5	2,8	32,5	117,6	3,6
OKTO2, PL197	34,7	86,8	2,5	49,3	117,6	2,4
OKTO2, PL199	35,4	79,6	2,3	29,4	109,2	3,7
OKTO2, PL201	28,1	88,8	3,2	26,8	109,2	4,1
OKTO2, PL203	34,4	78,0	2,3	—	—	—
KESKIARVO	33,0	86,1	2,6	33,1	111,1	2,6
HK2, PL218	44,4	90,9	2,0	—	—	—
HK2, PL220	32,9	81,3	2,5	31,2	95,5	3,1
HK2, PL222	39,0	73,5	1,9	31,2	95,5	3,1
HK2, PL224	29,8	64,7	2,2	44,9	89,9	2,0
HK2, PL226	35,4	73,5	2,1	30,0	89,9	3,0
HK2, PL228	30,3	65,9	2,2	34,0	95,5	2,8
KESKIARVO	33,5	71,8	2,1	34,2	93,3	2,7

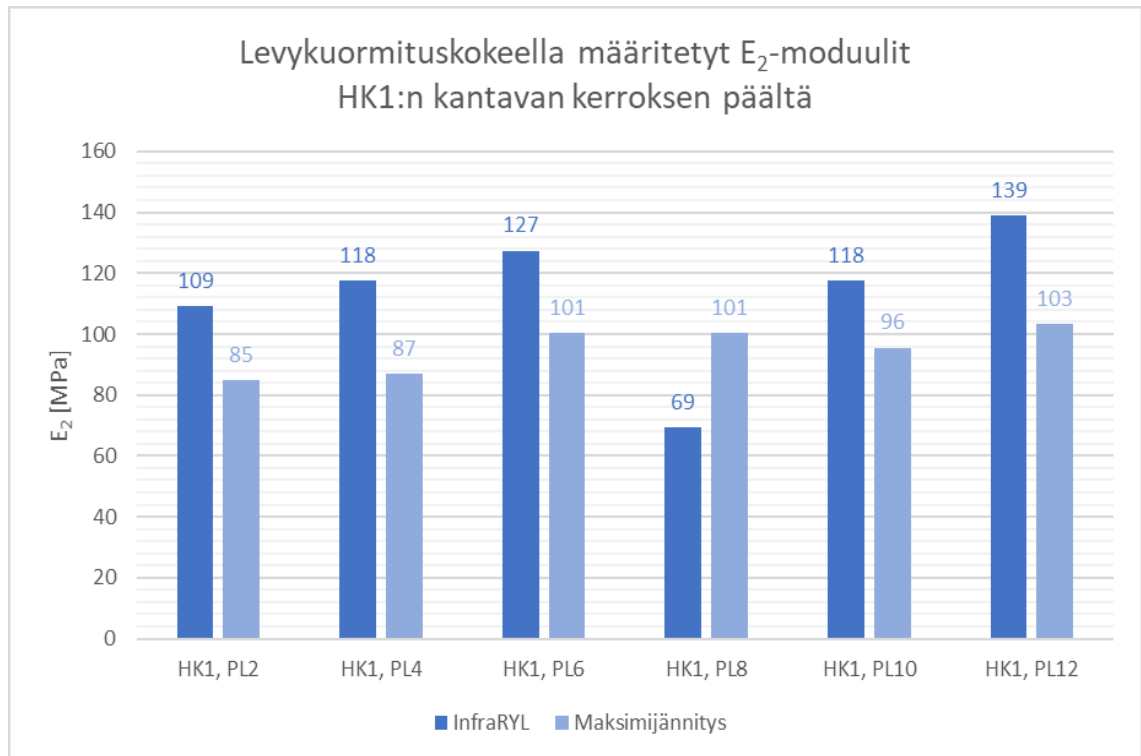
Kuvassa 58 on esitetty InfraRYL:n mukaan ja kuvassa 59 maksimijännitysten mukaan laskettujen E_2 -moduulien vaihtelut koerakenneosuuksittain. Kuvissa 60-63 on esitetty molemmiin tavoin lasketut E_2 -moduuliarvot mittauspisteittäin. Tiiviyssuhdetta E_1/E_2 pidetään yhtenä tiivistykseen liittyvänä laadunvalvontamittarina.



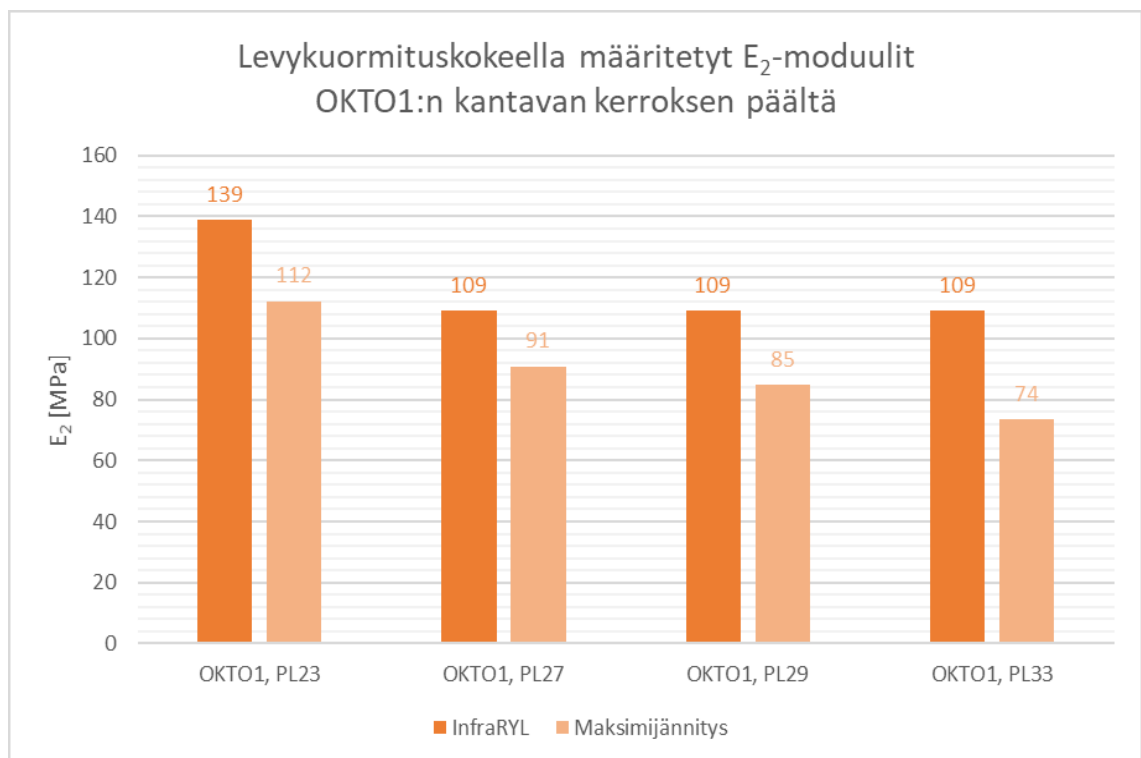
Kuva 58. Maksimijännitysten mukaan laskettujen E_2 -moduulien vaihtelut koerakenneosuuksittain.



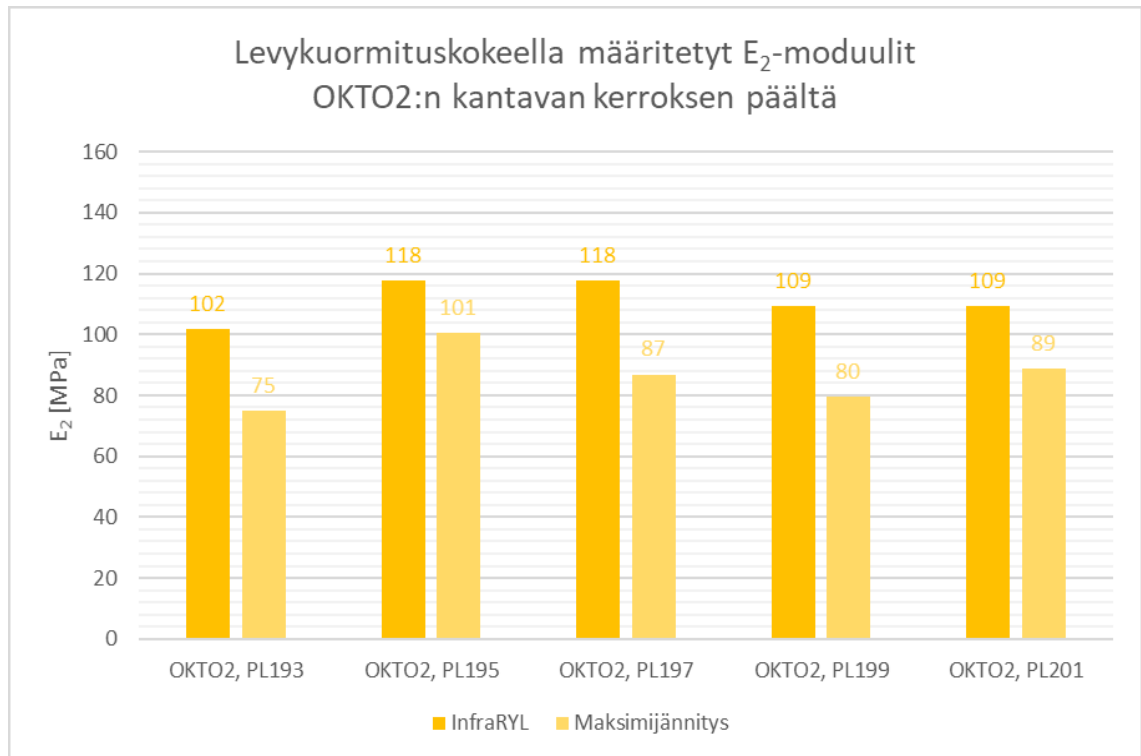
Kuva 59. InfraRYL:n mukaan laskettujen E_2 -moduulien vaihtelut koerakenneosuuksittain.



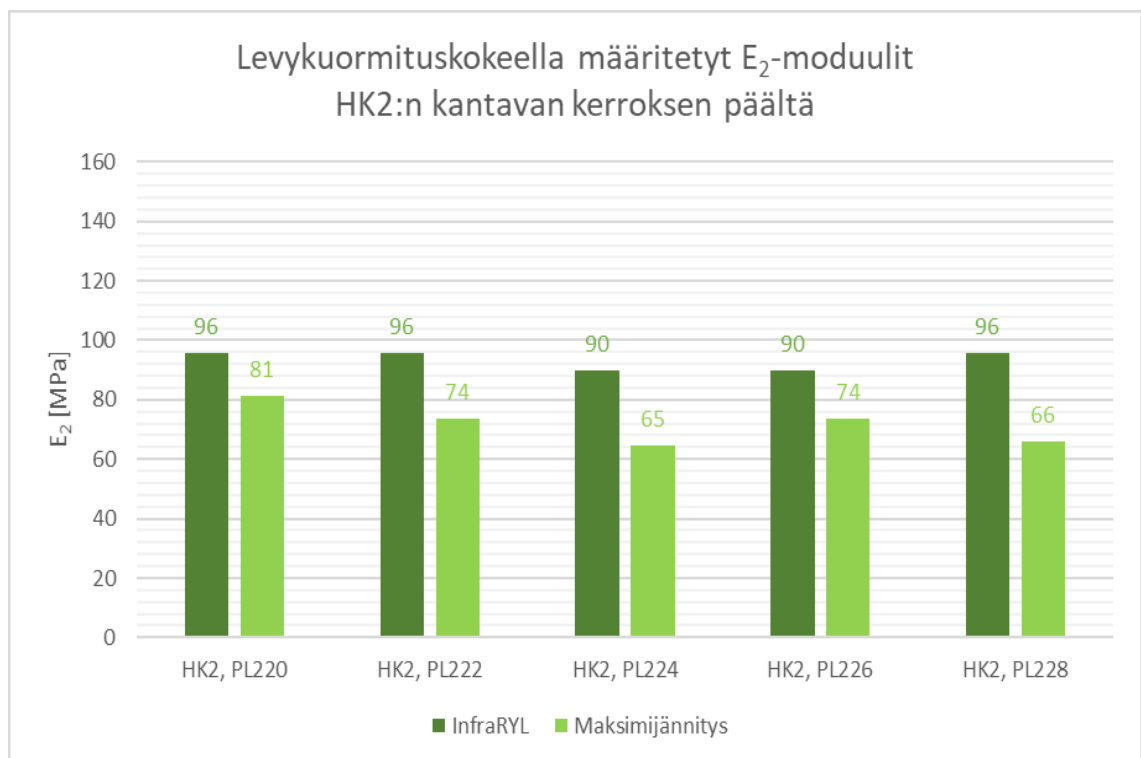
Kuva 60. HK1-osuudelta mitatut E_2 -moduulit molemmilla tavoilla laskettuna.



Kuva 61. OKTO1-osuudelta mitatut E_2 -moduulit molemmilla tavoilla laskettuna.



Kuva 62. OKTO2-osuudelta määritetyt E_2 -moduulit molemmilla tavoilla laskettuna.



Kuva 63. HK2-osuudelta määritetyt E_2 -moduulit molemmilla tavoilla laskettuna.

Kuten kuvista voidaan huomata, ovat levykuormituskokeiden tuloksena saadut kantavuusarvot suurempia kuin ne rakenteiden E-moduulit, jotka on laskettu InfraRYL:n mukaan. Kuten taulukosta 22 voidaan huomata, InfraRYL:n mukainen laskentatapa on johdantanut erityisesti hiekoilla suurempiin tiiviyssuhteisiin kuin minimi- ja maksimikuormituksen perusteella laskettujen E-moduulien mukaan määritetyt tiiviyssuhteet. Tämä ilmiö on havaittu muissakin kohteissa laadunvalvonnan yhteydessä ja sitä on käsitelty kappaleen 5.3.1 lopussa.

Levykuormituskokeiden tuloksista nähdään, että mitatut kantavuudet ovat suurempia HK1-osuudella kuin HK2-osuudella, vaikka rakennekerrokset ovat HK2-osuudella paksummat. OKTO1- ja OKTO2-osuuksilla mitattujen kantavuuksien keskiarvot ovat lähellä toisiaan, mutta OKTO2-osuudella on vähemmän hajontaa. OKTO2-osuudella rakennekerrokset ovat paksummat kuin OKTO1-osuudella. Sekä suodatinkerroksen että kantavan kerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulosten perusteella on oletettavaa, että rakenteiden tiivistäminen on onnistunut paremmin HK1- ja OKTO1-osuuksilla kuin HK2- ja OKTO2-osuuksilla. Eri koerakenneosuuksilla olevat erilaiset pohjaolosuhteet sekä eri tiivistystavat voivat vaikuttaa tuloksiin.

5.4.3 Pudotuspainolaitemittausten tulokset

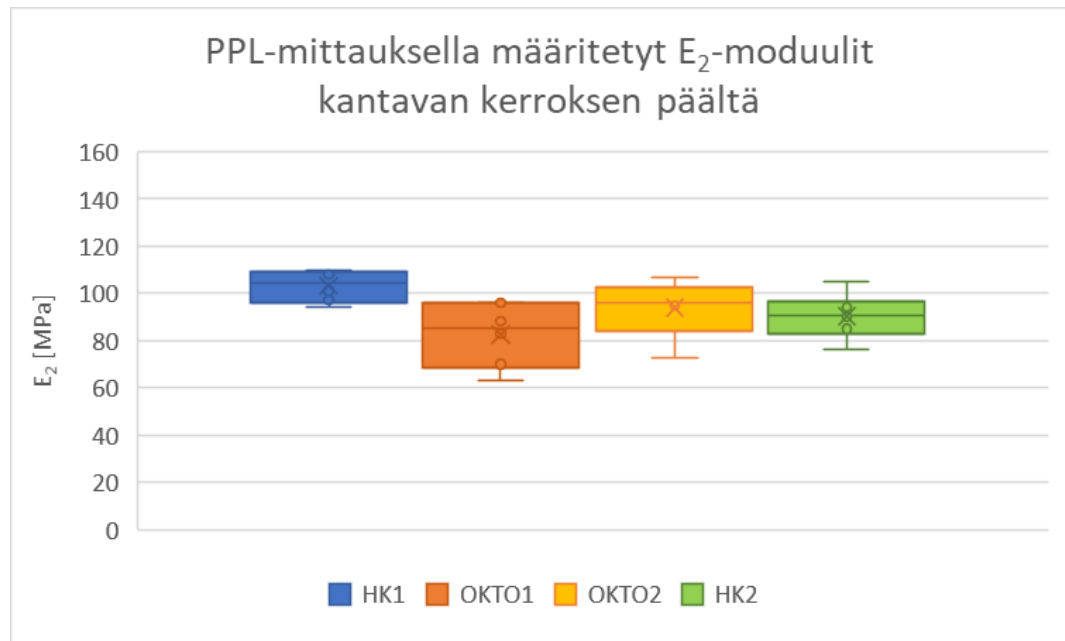
Pudotuspainolaitemittaukset tehtiin valmiin, tiivistetyn kantavan kerroksen päältä ennen profilointikerroksen tekemistä. Pudotuspainolaitemittaukset tehtiin samalla viikolla kuin levykuormituskokeet kantavan kerroksen päältä. Pudotuspainolaitemittausten mittausdata on esitetty liitteessä I. Siinä on esitetty myös kuormituksen suhteen normalisoidut taipumat.

Pudotuspainolaitemittauksista määritetyt E_1 - ja E_2 -moduuliarvot sekä tiiviyssuhteet on esitetty taulukossa 23. Taulukossa on yliviihattu ilmeisen virheellinen mittaustulos, jota ei ole huomioitu myöhemmissä laskelmissa.

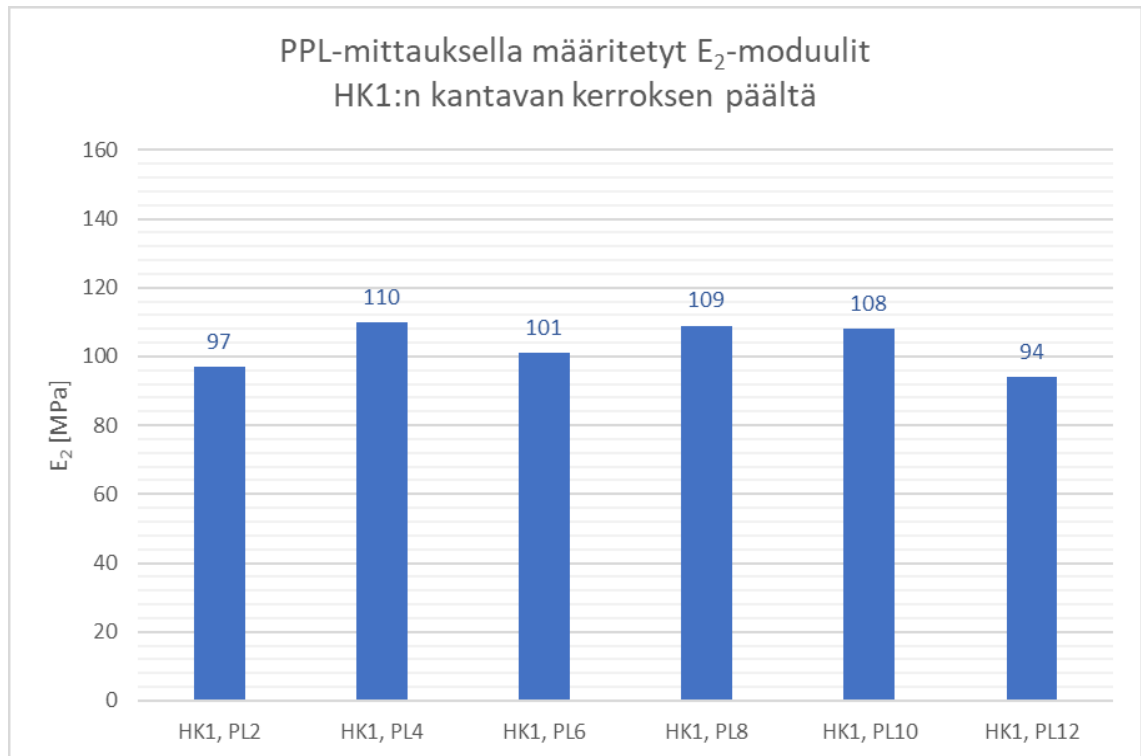
Taulukko 23. Pudotuspainolaitemittausten tuloksista määritetyt E-moduulit kantavan kerroksen päältä.

Mittauspiste	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₁ /E ₂
HK1, PL2	50	97	1,9
HK1, PL4	56	110	2,0
HK1, PL6	65	101	1,6
HK1, PL8	67	109	1,6
HK1, PL10	57	108	1,9
HK1, PL12	50	94	1,9
KESKIARVO	57,5	103,2	1,8
OKTO1, PL23	49	96	2,0
OKTO1, PL25	54	96	1,8
OKTO1, PL27	46	88	1,9
OKTO1, PL29	43	83	1,9
OKTO1, PL31	36	70	1,9
OKTO1, PL33	32	63	2,0
KESKIARVO	43,3	82,7	1,9
OKTO2, PL193	33	85	2,6
OKTO2, PL195	24	73	3,0
OKTO2, PL197	40	98	2,5
OKTO2, PL199	42	107	2,5
OKTO2, PL201	42	96	2,3
OKTO2, PL203	45	95	2,1
KESKIARVO	38,6	93,8	2,5
HK2, PL218	45	105	2,3
HK2, PL220	41	90	2,2
HK2, PL222	46	94	2,0
HK2, PL224	42	91	2,2
HK2, PL226	38	85	2,2
HK2, PL228	33	76	2,3
KESKIARVO	40,8	90,2	2,2

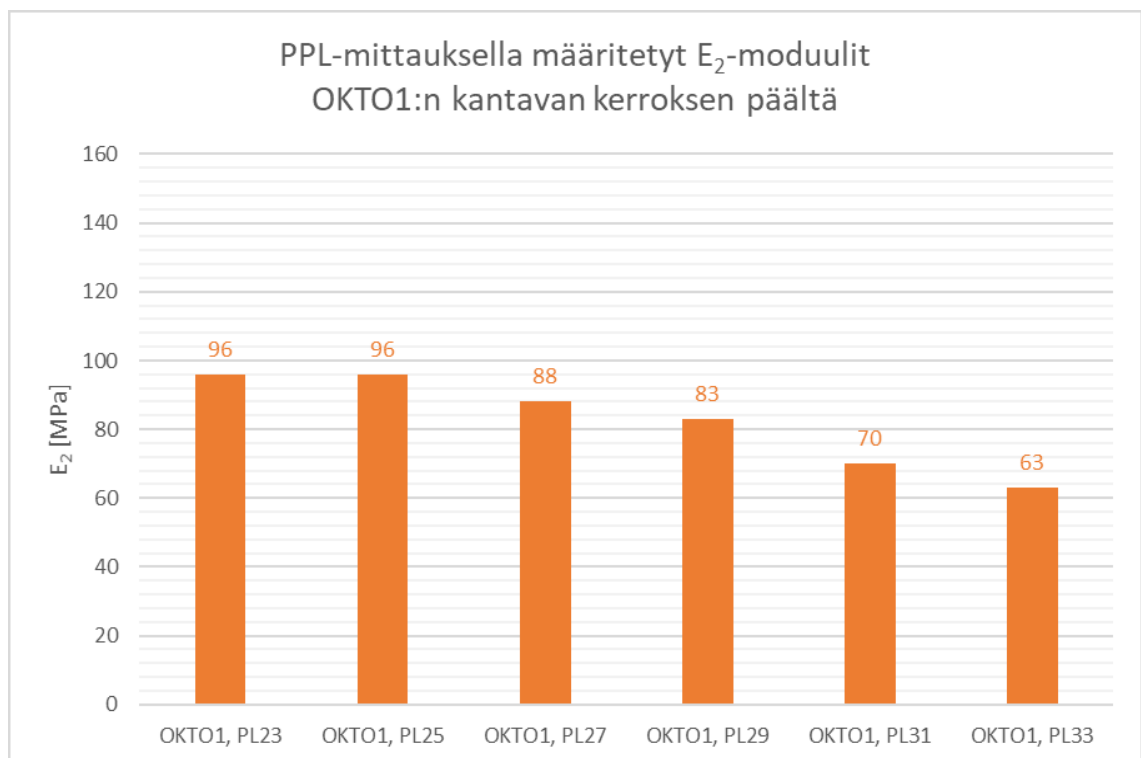
Kuvassa 64 näkyy PPL-mittauksista määritettyjen E_2 -moduulien vaihtelu koerakennesuuksittain. Kuvissa 65-68 näkyvät E_2 -moduulit mittauspisteittäin jokaisesta koerakenteesta.



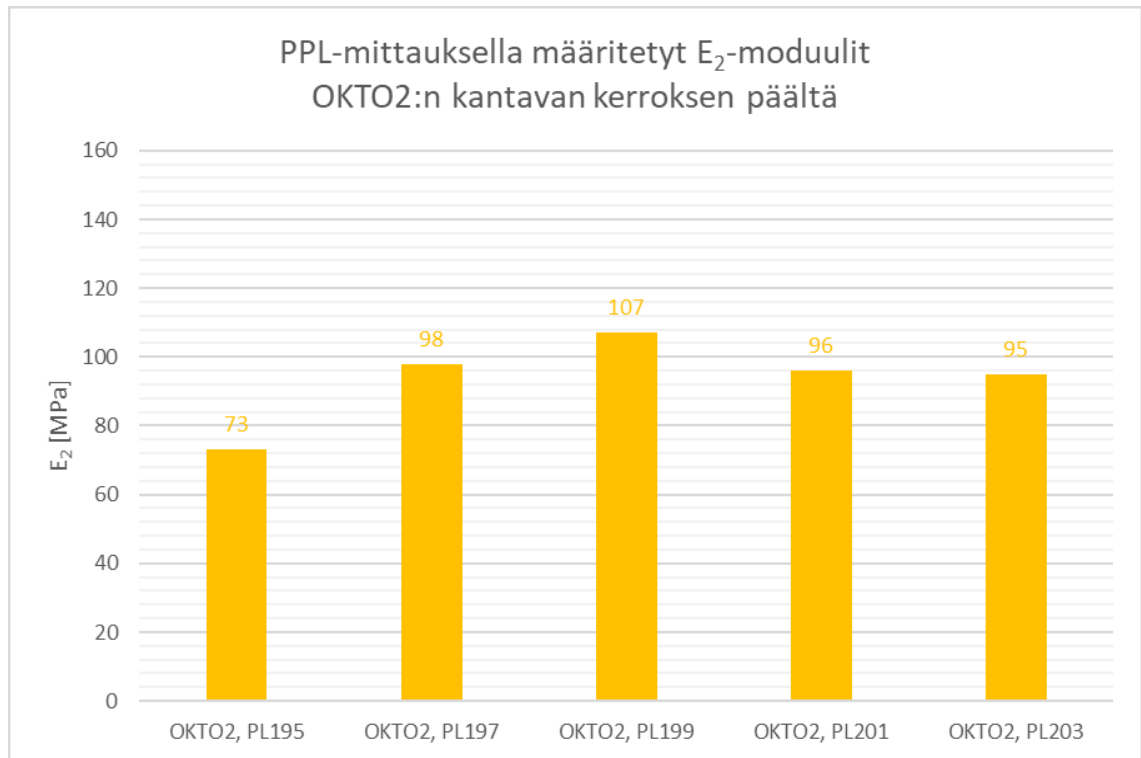
Kuva 64. Pudotuspainolaitteella määritettyjen E_2 -moduulien vaihtelu koerakennesuuksittain.



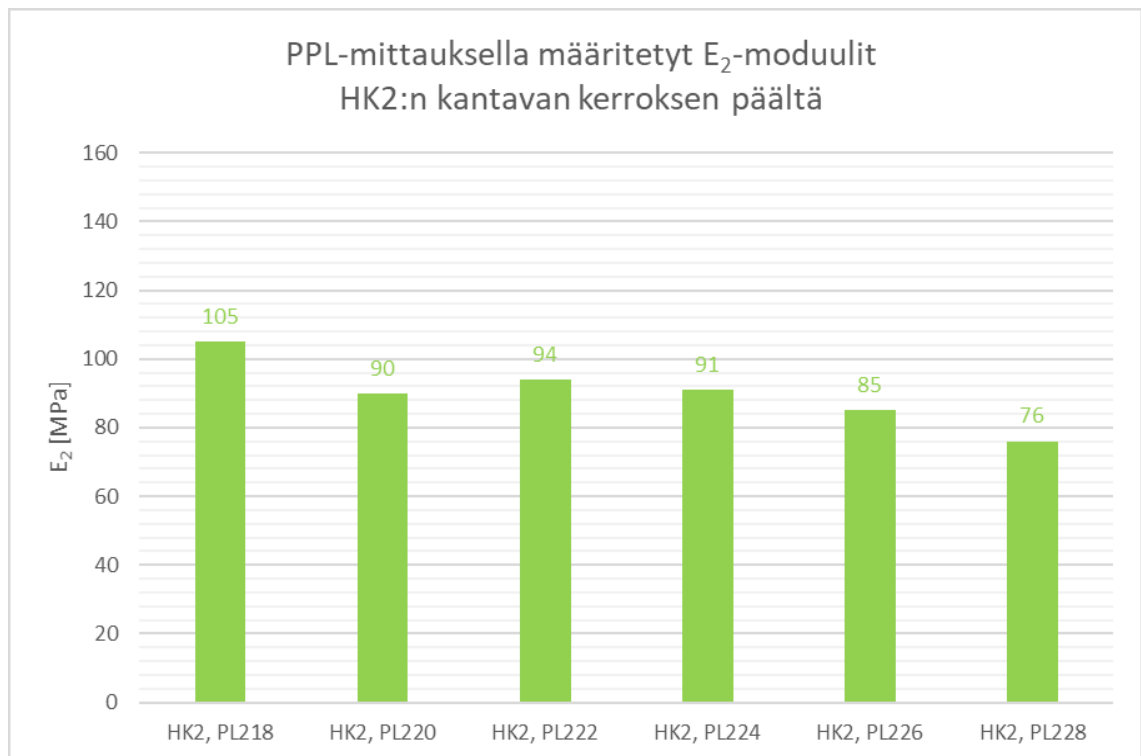
Kuva 65. HK1-osuudelta pudotuspainolaitteella määritetyt E_2 -moduulit.



Kuva 66. OKTO1-osuudelta pudotuspainolaitteella määritetyt E_2 -moduulit.



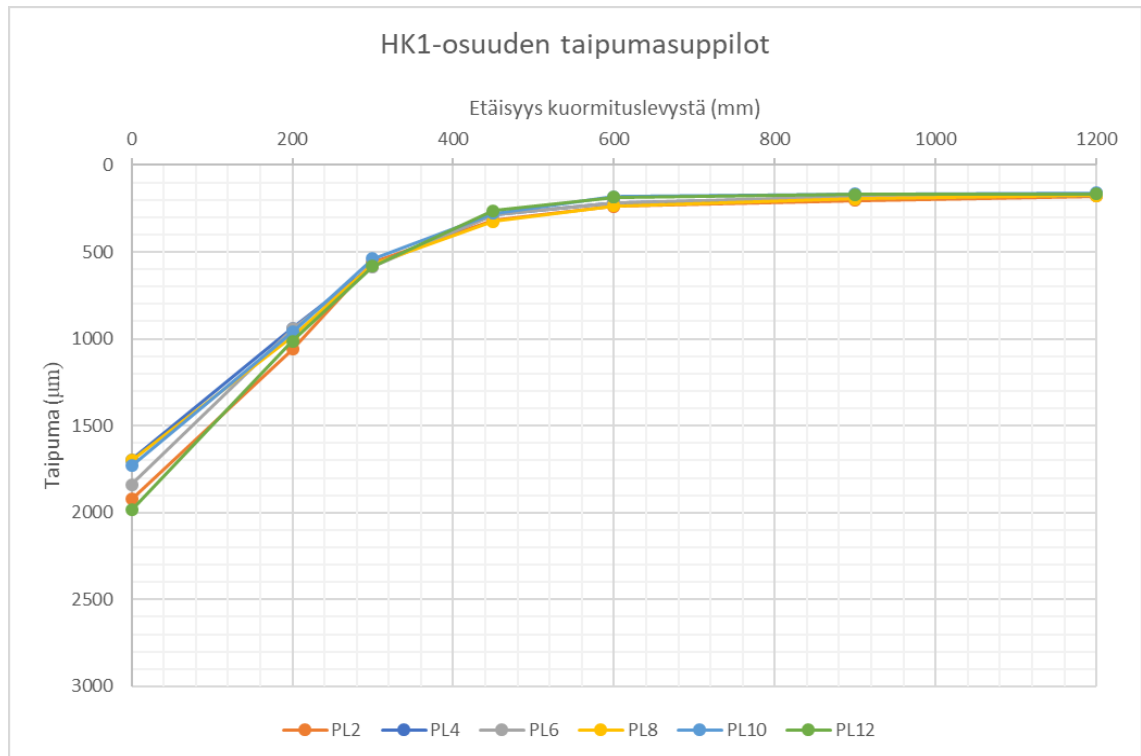
Kuva 67. OKTO2-osuudelta pudotuspainolaitteella määritetyt E_2 -moduulit.



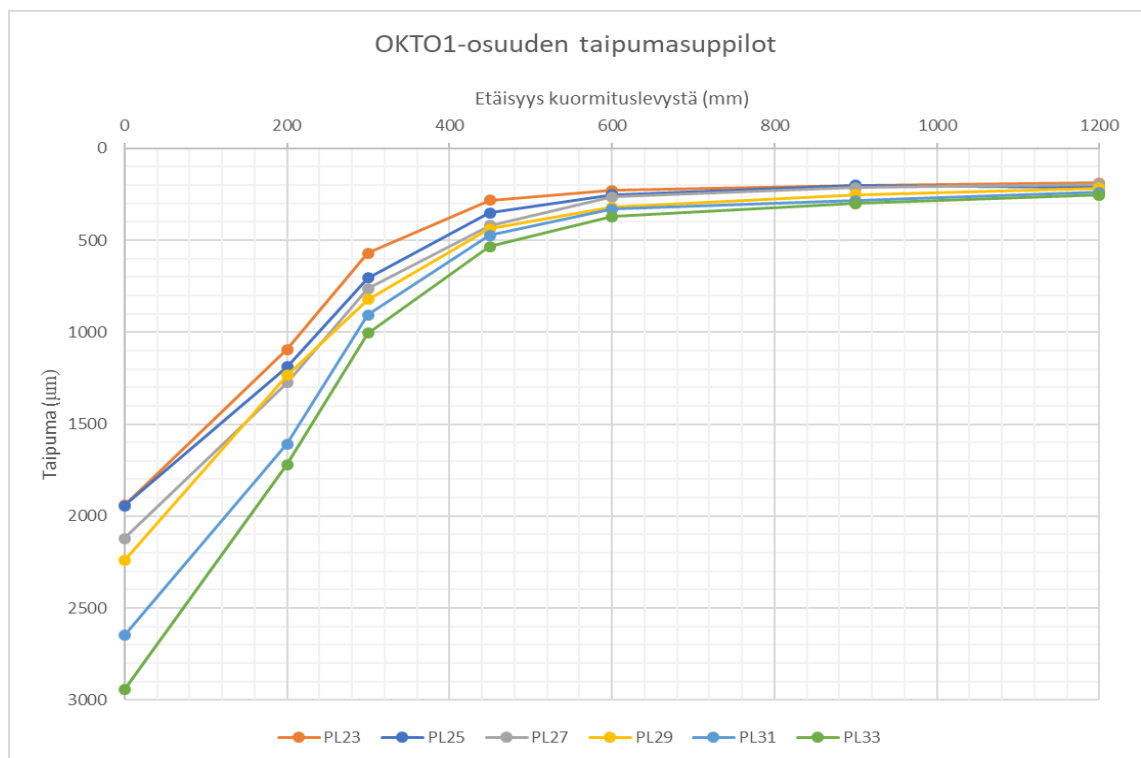
Kuva 68. OKTO2-osuudelta pudotuspainolaitteella määritetyt E_2 -moduulit.

Kun PPL-mittausten tuloksia verrataan levykuormituskokeella tehtyihin mittaustuloksiin, voidaan havaita, että PPL-mittaukset antavat keskimäärin pienempiä E-moduuleja kuin levykuormituskokeet erityisesti silloin kun levykuormituskokeiden E-moduulit on määritetty InfraRYL:n mukaisesti. Mittaustulosten ero johtuu kantavuusmittausten erilaisesta kuormitustavasta, lisäksi aiheeseen liittyvien tutkimusten perusteella myös olosuhteilla on vaikutusta siihen, että kummalla tutkimustavalla saadaan suurempia tuloksia sitomattoman kerroksen päältä (kappale 3.3).

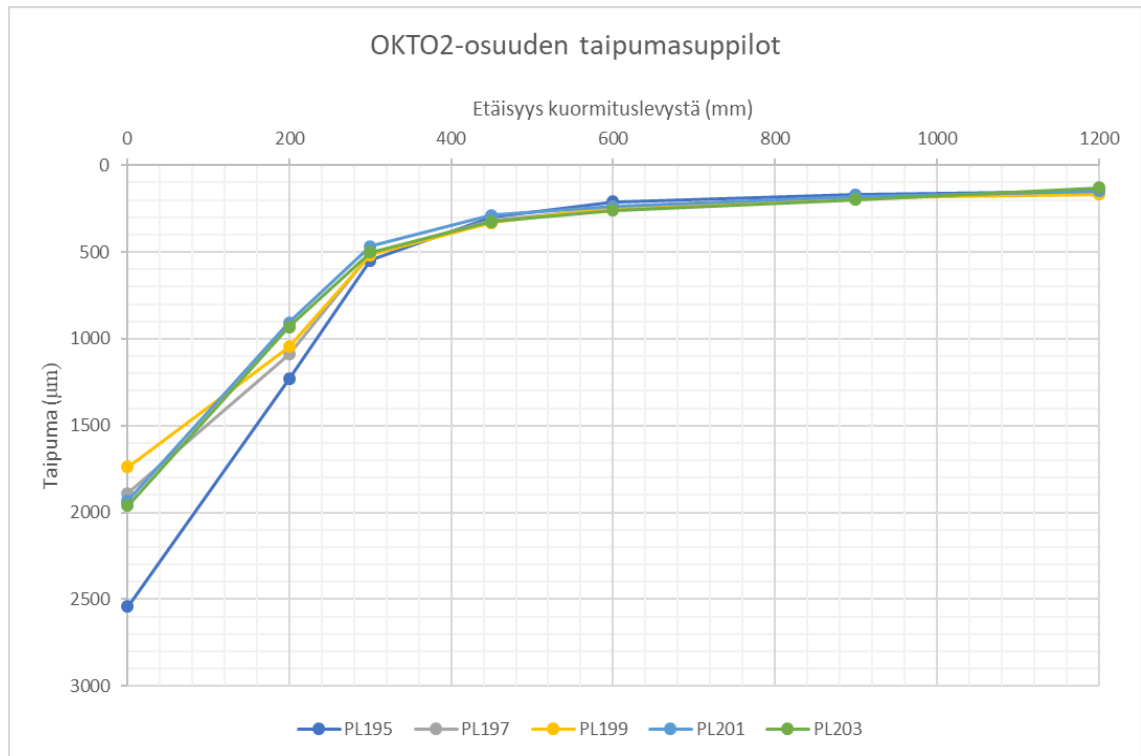
Kuvissa 69-72 on esitetty PPL-mittausten normalisoiduista taipumista määritetyt taipumasuppilot. Pudotuspainolaitemittaukset on tehty 200 mm paksuisen yhdistetyn kantavan ja jakavan kerroksen päältä. Suodatin- ja eristekerroksen paksuus vaihteli koerakenteosuuksittain 850...1450 mm välillä. PPL-mittauksissa mitatut taipumat ulottuvat tierakenteessa noin 1200 mm syvyyteen, koska laitteen ulommaisin anturi on 1200 mm päässä kuormituslevystä.



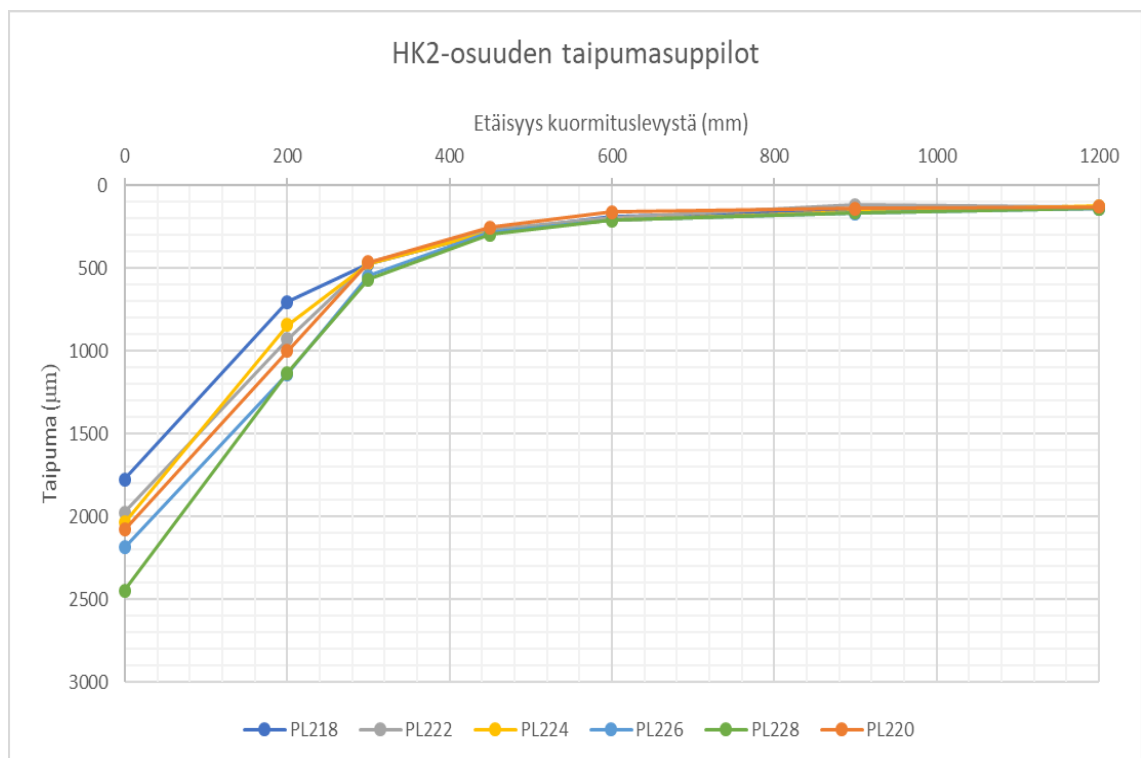
Kuva 69. HK1-osuuden taipumasuppilot.



Kuva 70. OKTO1-osuuden taipumasuppilot.



Kuva 71. OKTO2-osuuden taipumasuppilot



Kuva 72. HK2-osuuden taipumasuppilot.

Taipumasuppiloista voidaan nähdä kaikkien koerakenneosuuksien osalta mittaustulosten hajaantumista. Muilla paitsi OKTO1-osuudella selkeää hajaantumista tapahtuu noin 250 mm:n syvyyteen saakka. OKTO1-osuudella selvää hajaantumista tapahtuu 900 mm:n syvyyteen saakka eivätkä mittaustulokset 900 mm:n jälkeenkään ole yhtä yhteneviä kuin muilla koerakenneosuuksilla. Kuten kuvasta 64 voidaan nähdä, OKTO1-osuudella E₂-moduulien hajonta on ollut suurempi kuin muilla osuuksilla. Jokaisella koerakenneosuudella kauimmaisen anturin mittaama taipuma on ollut vielä noin 125...250 µm.

Kuten pudotuspainolaitteen toimintaperiaatetta käsittelevässä kappaleessa 2.6.2 kerrottiin, voidaan erilaisten taipumasuppiloparametrien avulla kuvata tien eri rakennekerroksien jäykkyyttä. Väliltä d₀-d₂₀₀ määritetyt taipumasuppiloparametrit kuvaavat koerakenteiden yhdistetyn kantavan ja jakavan kerroksen taipumaa ja väliltä d₂₀₀-d₉₀₀ määritetyt taipumasuppiloparametrit kuvaavat koerakenneosuuksien suodatinkerroksen taipumaa. Väliltä d₉₀₀-d₁₂₀₀ määritetyt taipumasuppiloparametrit kuvaavat suodatin- ja eristekerrosten alaosan sekä etenkin OKTO1-rakenteella myös pohjamaan taipumaa. Koerakenteista lasketut taipumasuppiloparametrit on esitetty taulukossa 24.

Taulukko 24. Koerakenteista lasketut taipumasuppiloparametrit.

Mittauspiste	SCI d ₀ -d ₂₀₀ (µm)	d ₂₀₀ -d ₉₀₀ (µm)	BCI d ₉₀₀ -d ₁₂₀₀ (µm)
HK1, PL2	864	854	26
HK1, PL4	758	751	14
HK1, PL6	897	759	12
HK1, PL8	712	794	18
HK1, PL10	770	795	7
HK1, PL12	969	845	2
KESKIARVO	828	800	13
OKTO1, PL23	848	891	16
OKTO1, PL25	757	987	-13
OKTO1, PL27	848	1061	16
OKTO1, PL29	1008	980	36
OKTO1, PL31	1041	1324	44
OKTO1, PL33	1224	1421	46
KESKIARVO	994	1135	32
OKTO2, PL195	1311	1061	22
OKTO2, PL197	802	899	31
OKTO2, PL199	693	859	22
OKTO2, PL201	1027	726	32
OKTO2, PL203	1031	733	66
KESKIARVO	973	856	35
HK2, PL218	1069	553	17
HK2, PL220	1078	859	12
HK2, PL222	1043	810	-9
HK2, PL224	1195	680	36
HK2, PL226	1044	971	27
HK2, PL228	1316	965	25
KESKIARVO	1140	806	23

Kappaleessa 5.4.3 esiteltiin SCI- ja BCI-arvoihin perustuva luokittelu kuvaamaan tierakenteen kuntoa. Kantavan kerroksen päältä määritettyjä SCI- ja BCI-arvoja ei voida suoraan verrata sorateiden pinnasta määritettyihin SCI- ja BCI-arvoihin, mutta jonkinlaista tarkastelua voidaan tehdä. Sorateiden SCI- ja BCI-arvoihin perustuva luokittelu on esitetty taulukossa 4.

Sorateiden SCI- ja BCI-arvoihin perustuvassa luokittelussa SCI-arvon ollessa yli 600 μm , rakenteen yläosa on erittäin heikko. Kantavan kerroksen päältä määritetyt SCI-arvot eivät kuitenkaan ole suoraan verrattavissa sorateiden tai ohuesti päällystetyille teille, koska kantavan kerroksen pinnassa ei ole murskeen päällä kulutuskerrosta.

Koerakenteiden BCI-arvojen keskiarvot vaihtelevat 13...35 μm . Sorateiden SCI- ja BCI-arvoihin perustuvassa luokituksessa BCI-arvon ollessa välillä 10...30 μm , rakenteen alaosa luokitellaan riittäväksi. BCI-arvon ollessa yli 30 μm , rakenteen alaosa luokitellaan puutteelliseksi.

5.5 OKTO-eristeen E-moduuli koerakenteiden perusteella

Ihannetilanteessa vertailuhiekan E-moduuli olisi ollut 100 MPa ja hiekkakerrokset yhtä paksuja kuin OKTO-eristekerrokset, jolloin vertailupareista mitattuja E-moduuleja olisi ollut mahdollista suoraan verrata toisiinsa ja tehdä alustavia johtopäätöksiä Odemark-mitoituksessa käytettävästä OKTO-eristeen E-moduulista tätä kautta. Koerakenteisiin ei kuitenkaan löytynyt kohtuullisen välimatkan päästä työmaan aikatauluihin sopivasti E-moduuliltaan 100 MPa hiekkaa, joten hiekkana käytettiin alkuoletuksen perusteella E-moduuliltaan 70 MPa hiekkaa. Koerakenteisiin käytetystä hiekasta tehtyjen neljän rakeisuustutkimuksen perusteella kyseisen hiekkakerroksen rakeisuuden perusteella määritetty E-moduuli vaihteli 50...70 MPa välillä. Koerakenteiden hiekkakerrokset mitoitettiin paksuudeksi kuin OKTO-eristekerrokset, jotta routanousuerot koerakenteiden välillä olisivat kohtuulliset.

Laskelmissa yhdistetyn kantavan ja jakavan kerroksen paksuus oli 200 mm ja käytetyn kalliomurskeen E-moduuli 200 MPa. Alkuperäisissä mitoituslaskelmissa oli pohjamaan moduulina käytetty 20 MPa silloisten lähtötietojen perusteella, mutta työmaahavaintojen perusteella pohjamaa erityisesti HK1- ja OKTO1-koerakenneseurauksien kohdalla oli pikemminkin laimaa savea kuin savista silttiä. Saven E-moduulina käytetään Tierakenteen suunnittelu -ohjeen mukaan 10 MPa maan leikkauslujuuden ollessa alle 40 kPa tai 35 MPa maan leikkauslujuuden ollessa yli 40 kPa. Silttiselle pohjamaalle käytetään Liikenneviraston ohjeen mukaan E-moduulia 20 MPa. (Liikennevirasto 2018, s. 21)

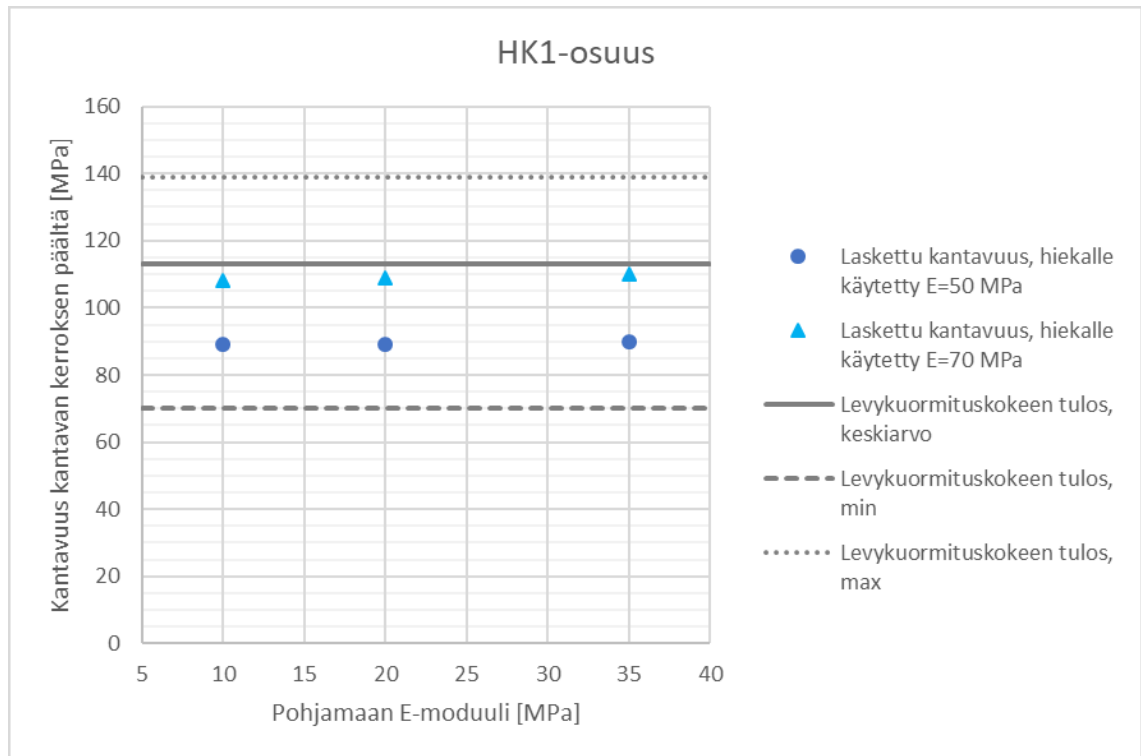
Taulukossa 25 on esitetty Odemark-menetelmällä lasketut kantavuudet koerakenteiden kantavan kerroksen päältä hiekan ja OKTO-eristeen sekä pohjamaan E-moduuleja varioiden. Odemark-menetelmällä laskettaessa hiekan E-moduulina on käytetty joko 50 tai 70 MPa koerakenteisiin käytetyn hiekan rakeisuuskäyrien mukaisesti. OKTO-eristeelle on laskennassa käytetty E-moduulina 70 MPa ja 100 MPa. Pohjamaan E-moduulina on laskennassa käytetty 10, 20 tai 35 MPa. Yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen E-

moduulina on käytetty 200 MPa koerakenteisin käytetyn murskeen rakeisuuskäyrän mukaisesti. Taulukossa ovat myös InfraRYL:n mukaan lasketut levykuormituskokeista saadut minimi-, maksimi- ja keskiarvokantavuudet koerakenneosuuksittain.

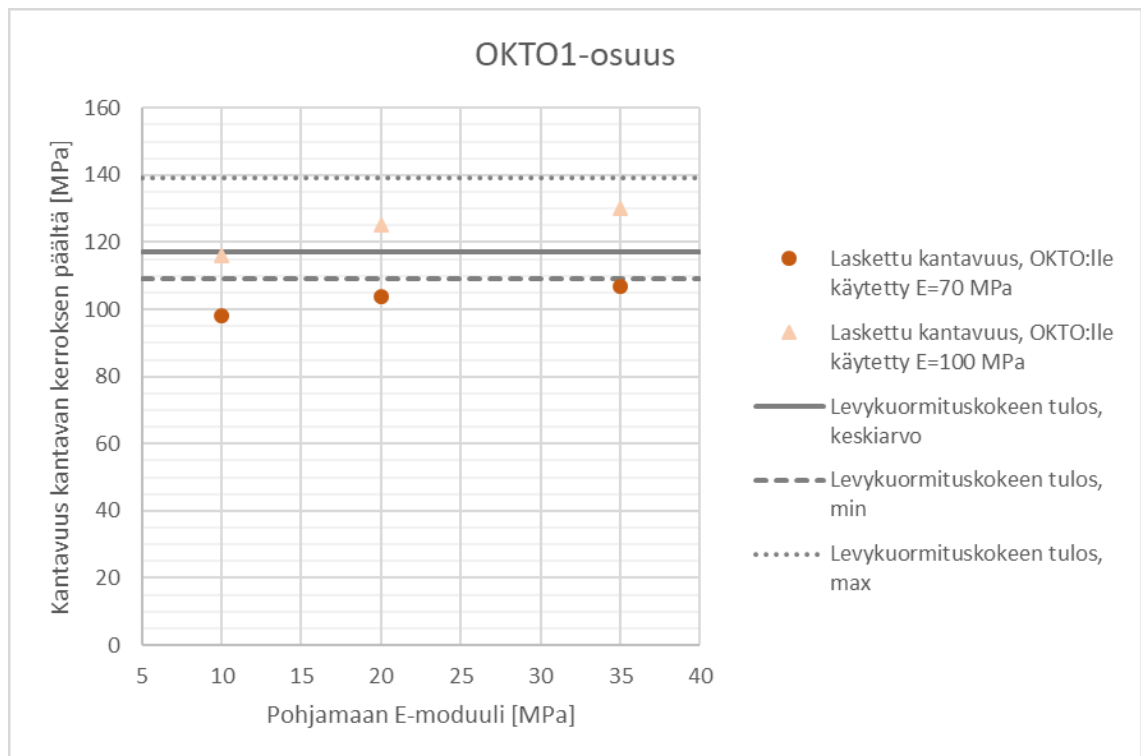
Taulukko 25. Odemark-mitoituksella saadut laskentatulokset koerakenteista.

	Levykuormitus- kokeella mitattu kantavuus kanta- van kerroksen päältä (MPa)	Hiekan / OKTO- eristeen E-mo- duuli (MPa)	Pohjamaan E-moduuli (MPa)	Laskennallinen kantavuus kanta- van kerroksen päältä (MPa)
HK1	$E_{min} = 70 \text{ MPa}$ $E_{max} = 139 \text{ MPa}$ $E_{KA} = 113 \text{ MPa}$	50	10	89
			20	89
			35	90
		70	10	108
			20	109
			35	110
OKTO1	$E_{min} = 109 \text{ MPa}$ $E_{max} = 139 \text{ MPa}$ $E_{KA} = 117 \text{ MPa}$	70	10	98
			20	104
			35	107
		100	10	116
			20	125
			35	130
OKTO2	$E_{min} = 102 \text{ MPa}$ $E_{max} = 118 \text{ MPa}$ $E_{KA} = 111 \text{ MPa}$	70	10	104
			20	107
			35	109
		100	10	125
			20	131
			35	133
HK2	$E_{min} = 90 \text{ MPa}$ $E_{max} = 96 \text{ MPa}$ $E_{KA} = 93 \text{ MPa}$	50	10	89
			20	90
			35	90
		70	10	109
			20	110
			35	110

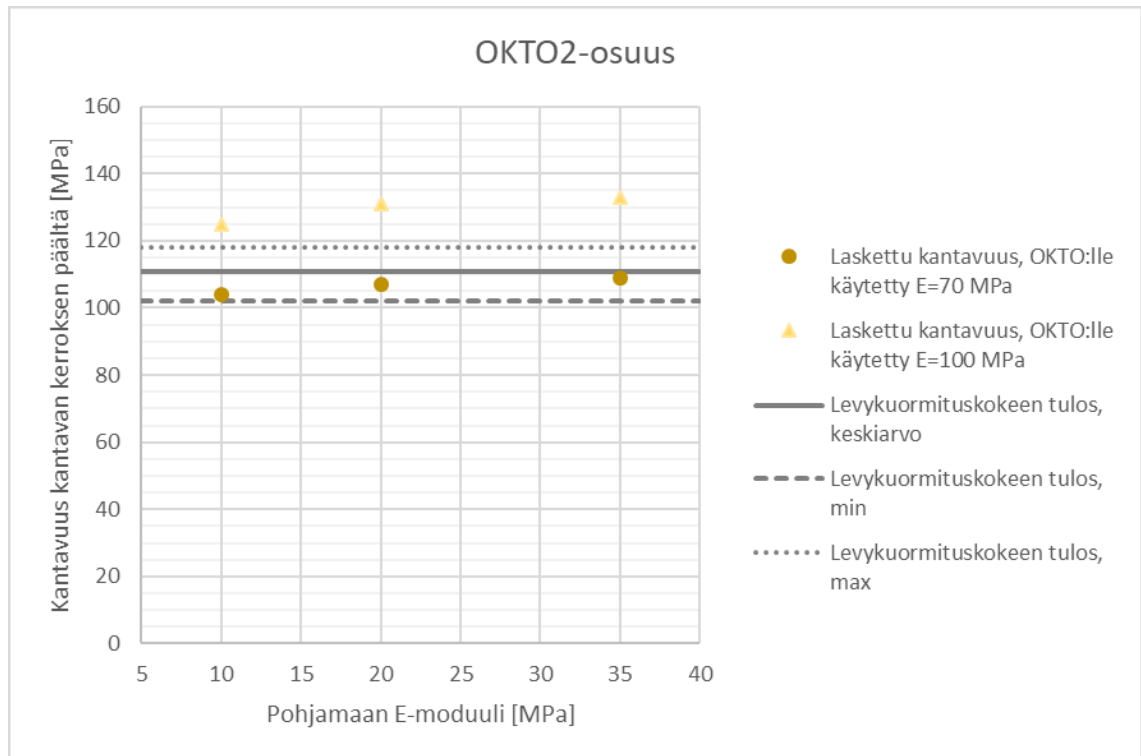
Taulukon tulokset on esitetty alla olevissa kuvissa 73-76 koerakenneosuuksittain. Kuvissa on esitetty laskennalliset kantavuudet kantavan kerroksen päältä eri hiekka- tai OKTO-eristeen E-moduuleilla pohjamaan E-moduulia varioiden. Levykuormituskokeen tuloksista saadut minimi-, maksimi ja keskiarvokantavuudet kantavan kerroksen päältä on esitetty kuvissa erityyppisillä viivoilla. Laskennalliset kantavuudet käytettäessä eri pohjamaan E-moduulia ja eri hiekka- tai OKTO-eristeen E-moduulia on esitetty kuvissa pisteillä. Kuvien avulla voidaan koerakenteista mitattuihin kantavuuksiin verrata eri pohjamaan ja hiekan tai OKTO-eristeen E-moduuleilla laskettuja laskennallisia kantavuuksia.



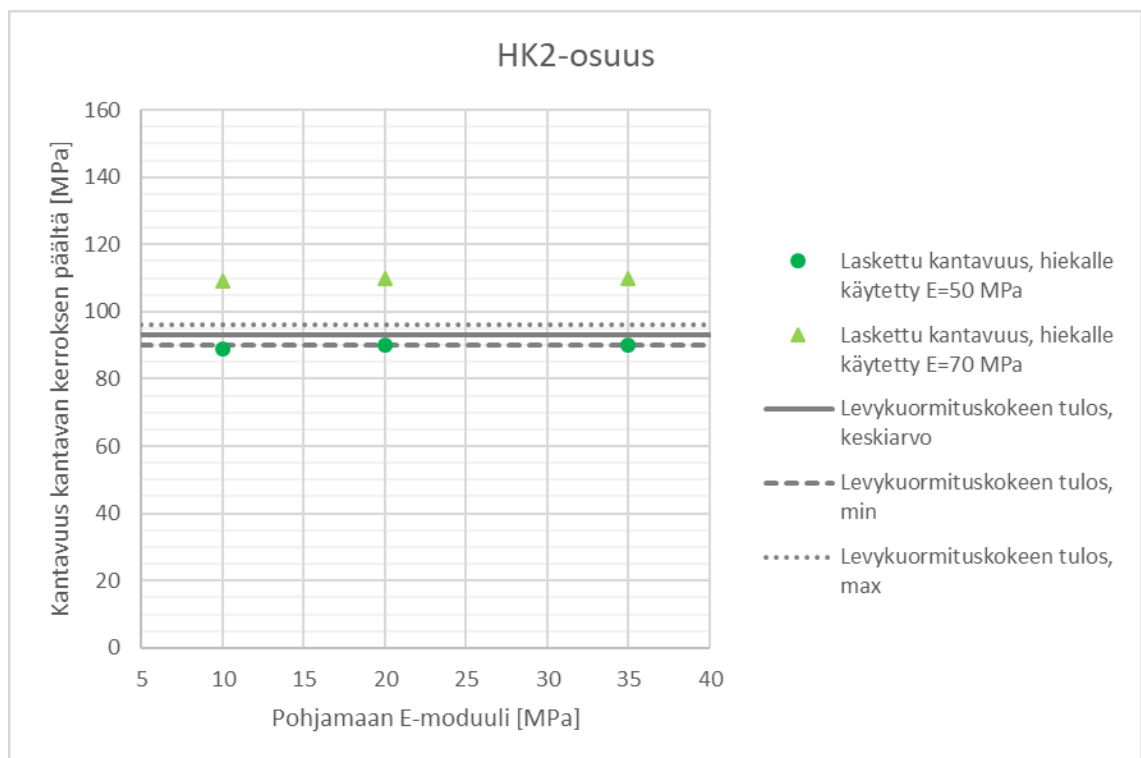
Kuva 73. HK1-osuudelta levykuormituskokeella kantavan kerroksen päältä mitattujen kantavuuksien vertailu laskennallisiin kantavuuksiin.



Kuva 74. OKTO1-osuudelta levykuormituskokeella kantavan kerroksen päältä mitattujen kantavuuksien vertailu laskennallisiin kantavuuksiin.



Kuva 75. OKTO2-osuudelta levykuormituskokeella kantavan kerroksen päältä mitattujen kantavuuksien vertailu laskennallisiin kantavuuksiin.



Kuva 76. HK2-osuudelta levykuormituskokeella kantavan kerroksen päältä mitattujen kantavuuksien vertailu laskennallisiin kantavuuksiin.

HK1-osuuden tuloksista voidaan havaita, että käytetyn hiekan E-moduuli on lähempänä 70 MPa kuin 50 MPa. Tämä sopii myös koeosuuksien rakentamisjärjestyksen kanssa. HK1-osuus rakennettiin HK2-osuuden jälkeen, jolloin HK2-osuuteen käytettiin myöhemmin maa-ainesalueelta tuotua hienorakeisempaa hiekkaa, jota oli kasoissa päällimmäisinä. HK1-osuuteen käytettiin karkearakeisempaa, ensin maa-ainesalueelta tuotua hiekkaa, jonka rakeisuuteen perustuva E-moduuli oli lähempänä 70 MPa kuin hienorakeisemmalla hiekalla.

HK1-koerakenteen hiekkakerros on niin paksu, että pohjamaan E-moduulin vaihtelulla ei ole suurtakaan merkitystä laskennalliseen E-moduuliin. Alueelta tehtyjen siipikairausten mukaan savisen siltin ja laihan saven redusoitu leikkauslujuus vaihteli välillä 20...40 kPa, joten on perusteltua käyttää J1:n tällä puolella pohjamaan E-moduulina alle 35 MPa arvoa.

HK2- ja OKTO2-osuuksilla mitatut tulokset ovat huomattavasti pienempiä kuin laskennalliset kantavuusarvot. Näillä koerakenneosuuksilla tiivistämismenetelmänä oli täryjyrä, joka on saattanut johtaa häiriintymisherkän silttisen pohjamaan häiriintymiseen. Häiriintynyt pohjamaa voi vaikuttaa kantavuusmittausten tuloksiin. Hiekka- ja OKTO-kerrosten päältä tehtyjen levykuormituskokeiden sekä tiiviysmittausten perusteella voidaan arvioida HK1- ja OKTO1-koerakenneosuuksien tiivistyneen paremmin kuin HK2- ja OKTO2-koerakenneosuudet. Myös huonommin tiivistyneet rakenteet johtavat pienempiin mitattuihin kantavuuksiin.

Odemark-menetelmässä käytetyt materiaalien E-moduulit pitävät sisällään oletuksia esimerkiksi materiaalien riittävästä tiiviyydestä. Koska koerakenneosuudet HK1 ja OKTO1 ovat tehtyjen mittausten perusteella tiivistyneet paremmin kuin HK2 ja OKTO2, on perustellumpaa tarkastella OKTO1-osuudelta tehtyjä Odemark-laskentoja OKTO-eristeen Odemark-laskennassa käytettävän E-moduulin määrittämiseksi.

OKTO1-osuuden tuloksista nähdään, että pohjamaan E-moduulista riippumatta laskennallinen E-moduuli on lähimpänä mitattuja tuloksia, kun OKTO-eristeen E-moduulina käytetään 100 MPa. 70 MPa:n E-moduuliltaan mittaustulokset eivät vastaa edes alinta koerakenteelta mitattua tulosta, vaikka pohjamaan moduulina laskennassa käytettiin 10 MPa. Mittaustulokset tukevat vahvasti sitä oletusta, että OKTO-eristeelle voidaan käyttää Odemark-laskentaan perustuvassa kuormituskestävyysmitoituksessa E-moduulina 100 MPa.

6. LABORATORIOTUTKIMUKSET

Koerakenteissa käytetyille OKTO-eristeelle ja laboratoriotutkimuksia varten erikseen hankitulle vertailuhiekalle tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteet -yksikön laboratoriossa syklisiä ja staattisia kolmiaksiaalikokeita. Tutkimustulokset on tiivistetysti esitetty tässä kappaleessa ja kolmiaksiaalikokeista tehty testausselostus liitteessä J.

6.1 Tehdyt laboratoriotutkimukset

Laboratoriokokeet tehtiin syksyn 2018 ja tammikuun 2019 aikana. Laboratoriokokeissa OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä verrattiin rakeisuuskäyränsä perusteella E-moduuliltaan 100 MPa:n vertailuhiekkaan. OKTO-eristeen optimivesipitoisuuden ja kuivairtitiheyden määrittämisessä käytettiin apuna koerakenteista saatuja mitaustuloksia.

OKTO-eristeen ja vertailuhiekan jäykkyysmoduulit (resilient-moduulit) määritettiin standardin SFS-EN 13287-7:en Method B:tä mukaillen syklisellä kolmiaksiaalikokeella. Sykliset kolmiaksiaalikokeet tehtiin Maa- ja pohjarakenneyksikön kehittämällä kuormituslaitteistolla (kuva 77).



Kuva 77. Kuva kuormituslaitteistosta.

Koekappaleiden halkaisijat olivat kokeen alussa noin 200 mm ja korkeudet noin 400 mm. OKTO-eristeestä tehtiin viisi koekappaletta ja vertailuhiekasta kaksi koekappaletta. Koekappaleissa vaihdeltiin hienoainespitoisuutta, vesipitoisuutta ja tiiveyttä. Hienoainespitoisiin OKTO-eristekoekappaleisiin lisättiin noin 8 % alle 0,25 mm kokoisia jakeita, 10 % 0,25-0,5 mm kokoisia jakeita ja 14,5 % 0,5-1,0 mm kokoisia jakeita kuiva-aineksen kokonaismassasta. Hienoainespitoisen OKTO-eristeen rakeisuuskäyrä oli OKTO-eristeelle määritetyn rakeisuusalueen reunalla. Kyllästettyjen koekappaleiden kyllästys tehtiin vasta esikuormituksen jälkeen. Taulukossa 26 on esitetty koekappaleet ja niiden kuvaukset. Tähdellä merkitys vesipitoisuudet on mitattu kokeen jälkeen, jolloin osa vedestä oli poistunut kokeen aikana eikä kaikkea kappaleesta poistunutta vettä oltu saatu talteen koekappaletta purettaessa.

Taulukko 26. Koekappaleiden kuvaukset, oletettu vesipitoisuus ja laskettu / arvioitu kuivairtitiheys.

Koekappaleen kuvaus	Vesipitoisuus w (%)	Kuivairtitiheys ρ_d (kg/m ³)
OKTO-eriste, w \approx 5% Ei lisättyä hienoaainesta, vesipitoisuus ja kuivairtitiheys lähellä koerakenneolosuhteita	5,0	1,62
OKTO-eriste, kyllästetty Ei lisättyä hienoaainesta, kyllästetty vedellä, kuivairtitiheys lähellä koerakenneolosuhteita	21 *	1,57
OKTO-eriste, hienoaainespitoinen, w \approx 5% Lisätty hienoaainesta, vesipitoisuus ja kuivairtitiheys lähellä koerakenneolosuhteita	5,0	1,61
OKTO-eriste, hienoaainespitoinen, kyllästetty Lisätty hienoaainesta, kyllästetty, kuivairtitiheys lähellä koerakenneolosuhteita	21 *	1,62
Tiivis OKTO-eriste, hienoaainespitoinen, kyllästetty Lisätty hienoaainesta, kyllästetty, kuivairtitiheys suurempi kuin koerakenneolosuhteissa	22 *	1,72
Vertailuhiekka, kyllästetty	17 *	1,78
Vertailuhiekka, w \approx 5%	4,7	1,78

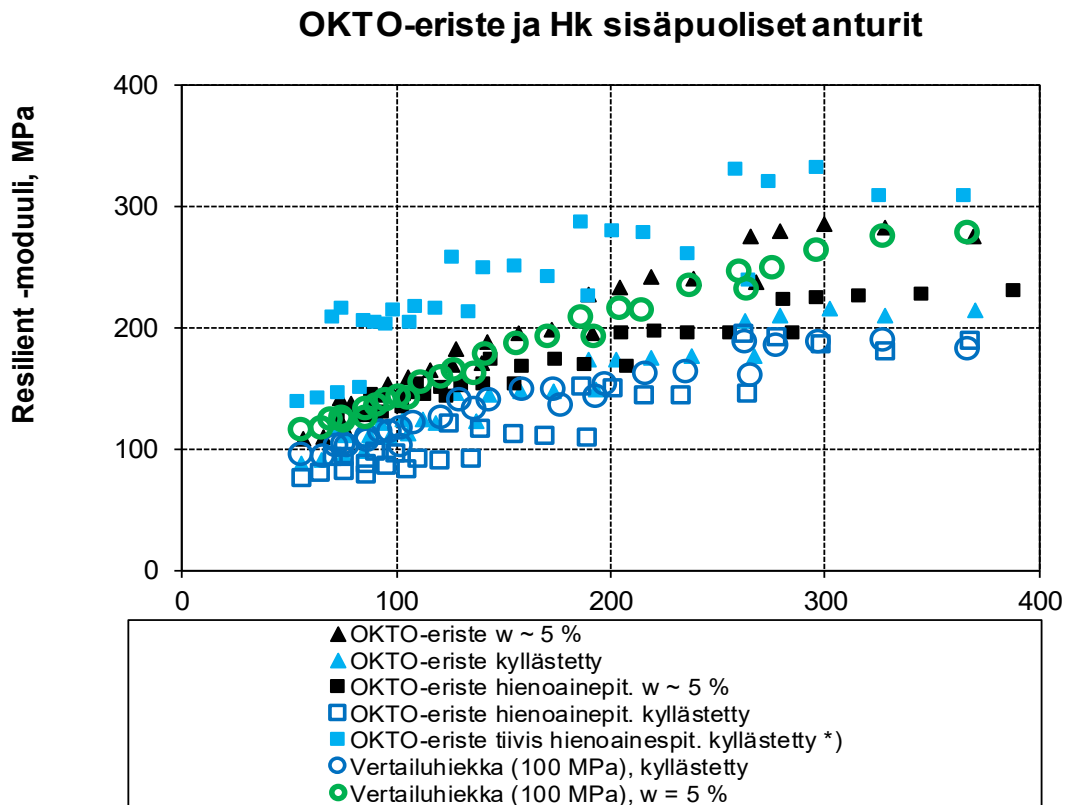
Koekappaleita esikuormitettiin, kunnes niiden muodonmuutokset stabiloituivat. Esikuormitus syklien määrä vaihteli 3 000...21 000 välillä koekappaleesta riippuen. Jäykkyysmoduulin arvot määritettiin koekappaleille esikuormituksen jälkeen. Hyvin tiivistetyn, hienoaainespitoisen ja kyllästetyn koekappaleen (M255_200mm_7) jäykkyysmoduuleihin tulee suhtautua varauksin, sillä eri sisäpuolisten siirtymäantureiden perusteella määritetyt jäykkyysmoduulit erosivat toisistaan huomattavasti.

Koekappaleista määritettiin vesipitoisuudet kolmessa osassa eli eri korkeustasoilta kokeen purkamisen jälkeen. Keskimmaisesta osasta määritettiin koekappaleiden rakeisuudet joko pesu- tai kuivaseulontana.

Syklisen kolmiaksaalikokeen jälkeen jokaiselle koekappaleelle tehtiin moniportainen, avoin staattinen kolmiaksaalikoe eri sellipaineilla. Staattiset kolmiaksaalikokeet tehtiin isotrooppisesti konsolidoituina kokeina.

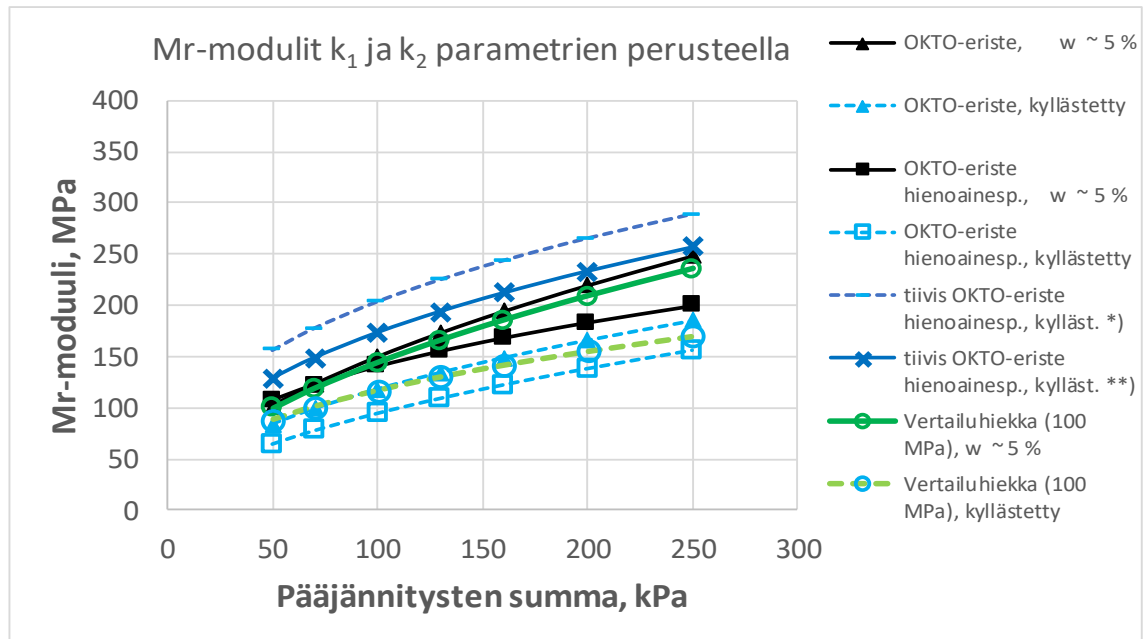
6.2 Laboratoriotutkimusten tulokset

Koekappaleista määritetyt vesipitoisuudet, rakeisuudet sekä staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset on esitetty liitteenä olevassa tutkimuslosteessa. Samoin tutkimuslosteessa on tarkemmin esitelty koekappaleille tehtyjen syklisen kolmiaksaalikokeiden tulokset (liite J). Kuvaan 78 on koottu kaikkien koekappaleiden jäykkyysmoduulit pääjännitysten suhteen.



Kuva 78. Koekappaleista määritetyt jäykkyysmoduulit pääjännitysten suhteen.

Kokeista määritettyjen jäykkyysmoduulien perusteella on sovitettu materiaaaliparametrit k_1 ja k_2 kaavaan 4. Näiden parametrien avulla määritetyt jäykkyysmoduulit on esitetty kuvassa 79.



Kuva 79. Koekappaleiden jäykkyysmoduulit kaavan 4 perusteella laskettuna, jossa *) kahdesta vastakkaisesta anturista ja **) kahdesta luotettavimmalla tavalla käyttäytyneestä anturista

6.3 OKTO-eristeen jäykkyysmoduuli ja arvioitu E-moduuli laboriokokeiden tulosten perusteella

Vaikka tie- ja katurakenteiden kuormituskestävyysmitoituksessa käytetään rakennemateriaaleille jännitystilasta riippumatonta E-moduulia eikä jäykkyysmoduulia, voidaan mitoituksessa käytettävän E-moduulin tueksi tarkastella tietyissä jännitystiloissa olevalle OKTO-eristeelle määritettyä jäykkyysmoduulia. Tämän lisäksi OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä verrataan rakeisuuskäyränsä perusteella E-moduuliltaan 100 MPa:n vertailuhiekan palautuvaan muodonmuutuskäyttäytymiseen.

Kuten kappaleessa 2.5.1 todettiin, voidaan olettaa suodatinkerroksessa käytettävään materiaaliin kohdistuvan pääjännitysten summan vaihtelevan 25...50 kPa:n välillä. Tyyppillisesti suodatinkerroksessa vaikuttavana pääjännitysten summana voidaan pitää 50 kPa. Taulukossa 27 on esitetty kaavalla 4 määritetyt jäykkyysmoduulit pääjännitysten ollessa 50 kPa.

Taulukko 27. Koekappaleille lasketut jäykkyysmoduulit pääjännitysten ollessa 50 kPa.

Koekappaleen kuvaus	M_r , kun $\theta = 50$ kPa (MPa)
OKTO-eriste, $w \approx 5\%$	102
OKTO-eriste, kyllästetty	84
OKTO-eriste, hienoainespitoinen, $w \approx 5\%$	107
OKTO-eriste, hienoainespitoinen, kyl- lästetty	65
OKTO-eriste, tiivis, hienoainespitoinen, kyllästetty *	156
OKTO-eriste, tiivis, hienoainespitoinen, kyllästetty **	128
Vertailuhiekka, kyllästetty	88
Vertailuhiekka, $w \approx 5\%$	100

*) kahdesta vastakkaisesta anturista

**) kahdesta luotettavimmalla tavalla käyttäytyneestä anturista

Materiaaliin vaikuttavien pääjännitysten ollessa 50 kPa:a, OKTO-eristeestä tehtyjen koekappaleiden jäykkyysmoduulit vaihtelevat tiiviystilasta, hienoainespitoisuudesta ja vesipitoisuudesta riippuen 65...156 MPa:n välillä. Tyypillisissä tie- ja katurakenteessa vallitsevissa olosuhteissa OKTO-eristeestä tehtyjen koekappaleiden jäykkyysmoduulit ovat 100 MPa:n luokkaa.

OKTO-eristeen ja vertailuhiekan palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä voidaan vertailla kuvien 80 ja 81 sekä taulukon 27 tulosten avulla. Ne OKTO-eristeestä tehdyt koekappaleet, joiden kuvauksessa ei ole mainintaa tiivis, olivat heikosti tiivistettyjä vertailuhiekoista tehtyihin koekappaleisiin verrattuna. Tiiviillä, kyllästetyllä ja hienoainespitoisella OKTO-eristekoekappaleella on huomattavasti suurempi jäykkyysmoduuli kuin muilla

koekappaleilla. Hienoainespitoisella ja kyllästetyllä OKTO-eristekoekappaleella on kaikista huonoin jäykkyyssmoduuli. Vertailukelpoisissa olosuhteissa OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaavat jäykkyyssmoduulit kuitenkin vastaavat mitaustarkkuuden puitteissa vertailuhiekan jäykkyyssmoduuleja.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tärkeimmät tulokset koskien OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä ja kuormituskestävyysmitoituksessa OKTO-eristeelle käytettävää E-moduulia on esitetty alla. Karkearakeisten tierakennemateriaalien palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä koskevan kirjallisuuskatsauksen ja työmaalla tehtyjen havaintojen perusteella tehdyt jatkotoimenpidesuositukset on esitetty kappaleen lopussa.

7.1 OKTO-eristerakenteen kuormituskestävyys

OKTO-eristettä valmistetaan paineellisella vesisuihkulla rakeistamalla ferrokromin valmistamisen yhteydessä syntyvää ferrokromikuonaa. OKTO-eriste on karkearakeinen, sitoutumaton materiaali, jonka vedenpidätyskyky on vähäinen eikä siinä ole käytännössä lainkaan hienoainesta. OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä voidaan siis tietyllä varauksella arvioida karkearakeisille, sitomattomille luonnonkiviainesmateriaaleille tehtyjen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä koskevien tutkimustulosten perusteella.

OKTO-eristeen leikkauslujuus on verrattavissa hiekan leikkauslujuuteen ja OKTO-eristeen rakeisen luonteen vuoksi on oletettavaa, että OKTO-eristeen palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavat samat tekijät kuin palautumattomaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Voidaan siis olettaa, että OKTO-eristeen kykyä vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia voidaan arvioida samoilla tavoilla kuin karkearakeisilla luonnonkiviaineksillakin.

Koska OKTO-eriste on tasarakeinen materiaali ja ei sisällä hienoainesta, ei se tiivisty yhtä helposti kuin sekarakeiset materiaalit. Hienoaineksen puuttumisen vuoksi OKTO-eristeen vedenläpäisykyky on hyvä, joten tiivistämistä varten kastelua ei kuitenkaan kannata yleensä tehdä.

OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä ja kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävää E-moduulin arvoa tutkittiin sekä koerakenneosuuksista tehtyjen tutkimusten että laboratoriotutkimusten perusteella. Koerakenteet rakennettiin Tornioon osaksi kevyen liikenteen väylää. Koerakenneosuuksilla käytettiin suodatinkerroksessa joko OKTO-eristettä tai hiekkaa. Koerakenneosuuksia oli neljä (HK1, OKTO1, OKTO2 ja HK2), joissa vaihtelivat suodatinkerrosten materiaalit ja paksuudet. Koerakenteissa yhdistetyn jakavan ja kantavan kerroksen sekä päällysteen paksuus pysyivät vakioina.

Ihannetilanteessa vertailuhiekka olisi ollut rakeisuuden perusteella E-moduuliltaan 100 MPa ja eri koerakenneosuuksien suodatinkerrokset saman paksuisia, mutta tämä ei ollut mahdollista. Koerakenneosuuksilla OKTO-eristeen palautuvaa muodonmuutuskäyttämistä verrattiin rakeisuuden perusteella E-moduuliltaan 50 ja 70 MPa:n vertailuhiekaan. Koerakenteita rakennettaessa tarkkailtiin OKTO-eristeen rakennettavuuteen liittyviä seikkoja erityisesti tiivistämiseen osalta. Eri koerakenneosuuspareilla käytettiin työmaaolosuhteista johtuen eri tiivistysmenetelmiä.

Koerakenteista tehtiin tiiviysmittauksia ja levykuormituskokeita suodatinkerroksen päältä sekä levykuormituskokeita ja pudotuspainolaitemittauksia valmiin kantavan kerroksen päältä. Näillä tutkimuksilla arvioitiin mm. koerakenteiden tiivistymisen onnistumista sekä olosuhteiden vaikutusta koerakenteiden pinnalta tehtyjen kantavuusmittausten tuloksiin. Koerakenteista saatujen mittaustulosten perusteella parhaiten tiivistyneiksi rakenteiksi todettiin koerakenneosuudet HK1 ja OKTO1. Kyseisten koerakenneosuuksien pohjamaa oli havaintojen perusteella savi. Koerakenneosuuksilla HK2 ja OKTO2 pohjamaa oli havaintojen perusteella siltistä maata, joka on häiriintymisherkempää. Koerakenneosuudet HK1 ja OKTO1 tiivistettiin tärylevyllä, kun taas koerakenneosuuksilla HK2 ja OKTO2 käytettiin pääasiallisena tiivistysmenetelmänä täryjyrää. Yksi syy HK2- ja OKTO2-osuukilta saatuihin heikompiin kantavuusmittausten tuloksiin saattaa olla silttisen pohjamaan häiriintyminen.

Koerakenneosuuksien tiivistetyn kantavan kerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tuloksia verrattiin Tierakenteen suunnittelu -ohjeen mukaisesti Odemarkin laskentakaavalla kantavan kerroksen päältä laskettuihin kantavuusarvoihin. HK1- ja OKTO1-koerakenteet oletettiin tutkimustulosten perusteella parhaiten tiivistyneiksi rakenteiksi. Näistä koerakenteista tehdyt mittaustulokset ja mittaustulosten perusteella tehdyt oletukset pohjamaasta tukevat vahvasti sitä, että Odemark-laskennassa OKTO-eristeelle voidaan suositella käytettäväksi E-moduulina 100 MPa.

Koerakenteissa käytetylle OKTO-eristeelle ja rakeisuuskäyränsä perusteella E-moduuliltaan 100 MPa:n vertailuhiekalle tehtiin staattisia ja syklisiä kolmiaksaalikokeita materiaalien lujuusominaisuuksien sekä jäykkyysmoduulien määrittämiseksi. Tyypillisesti suodatinkerroksessa käytettävään materiaaliin vaikuttavana pääjännitysten summana voidaan pitää 50 kPa. Tällä jännitystasolla sekä OKTO-eristeen että vertailuhiekan jäykkyysmoduuli oli noin 100 MPa. Lisäksi syklisten kolmiaksaalikokeiden tulosten perusteella vertailukelpoisissa olosuhteissa OKTO-eristeen palautuva muodonmuutuskäyttäytyminen vastasi mittaustarkkuuden puitteissa E-moduuliltaan 100 MPa:n vertailuhiekan palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä. Koerakenneosuuksilta saadut tulokset ja laboratorioskokeiden tulokset tukevat toisiaan, joten OKTO-eristeelle voidaan suositella

käytettäväksi kuormituskestävyyssmitoituksen Odemark-laskennassa E-moduulia 100 MPa.

7.2 Jatkoimenpidesuosituks

Kuormituskestävyyden yhteys materiaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen on vuosikymmenten kokemusten perusteella varmistettu luonnonmateriaaleille. Haasteena ovatkin uusiomateriaalit, joiden käyttöä pyritään aktiivisesti tie- ja katurakentamisessa lisäämään. Olisi tärkeää tutkia esimerkiksi sitä, toimivatko kaikki laadunvalvontamittaukset myös erilaisille uusiomateriaaleille.

Koerakenteita rakennettaessa tehtyjen havaintojen ja asiantuntijan haastattelun perusteella voidaan todeta, että esimerkiksi OKTO-eristeelle parhaiten sopivista tiivistysmenetelmistä ei ole varmuutta. Tätä olisi tärkeää tutkia lisää sekä OKTO-eristeen että mahdollisesti myös muiden uusiomateriaalien osalta. Tällainen tutkimus liittyy myös ylempänä mainittuun kuormituskestävyyden ja materiaalien palautuvan muodonmuutoskäyttäytymisen yhteyteen, sillä tiiveyden kasvaessa on todettu materiaalien lujuuden ja muodonmuutosmoduulien arvojen kasvavan. Näin materiaali pystyy vastustamaan paremmin sekä palautuvia että palautumattomia muodonmuutoksia.

Koerakenteiden osalta olisi hyvä tehdä kantavuusmittaukset päällysteen päältä esimerkiksi vuoden kuluttua rakentamisesta eli kesällä 2019. Tällöin olisi mahdollista arvioida uudelleen sitä, mistä eri koerakenneosuuksista saatujen mittaustulosten erot saattoivat johtua ja oliko esimerkiksi silttisen pohjamaan häiriintyminen yksi syy kantavuusmittaustulosten eroihin.

OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakennusohjetta voi olla tarpeen päivittää uusien tutkimustulosten osalta. Tämän päivityksen yhteydessä olisi hyvä ottaa enemmän kantaa OKTO-eristeen ja OKTO-murskeen tiivistämiseen liittyviin seikkoihin, koska OKTO-eristeelle parhaiten sopiviin tiivistysmenetelmiin ja tiivistyspaksuuksiin liittyi eniten epätietoisuutta työmaalla tehtyjen havaintojen ja haastattelujen perusteella.

LÄHTEET

Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Laukkanen, K., Petäjä, S., Pihlajamäki, J. & Spoof, H. (2001). Tien rakennekerrosten materiaalit - Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. 140 s.

Anttila, J. (2016). Kromin liuottaminen ferrokromikuonasta ultraääniavusteisesti peroksidipohjaisten reagenssien avulla. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto. 67 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-201605242682>.

Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. (2006). Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: Literature review. Publications of Finnish Rail Administration, A 5/2006. 201 p.+ app. 10 p.

Chan, F. (1990). Permanent deformation resistance of granular layers in pavements. Dissertation. University of Nottingham. 146 p.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto. 365 s.

Harju, I. (2017). Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Diplomityö. Oulun yliopisto. 100 s. + liitt. 28 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201711083051>.

Huhtinen, T., Palolahti, A. Räisänen, M. & Torppa, A. (2018). Kiviaineshuollon kehittäminen. Ympäristöministeriön raportteja 12/2018. 184 s. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160707/YMra_13_2018_Kiviaineshuollon_kehittaminen.pdf

Hölttä, J. (2012). Sekoitussyrsinnän soveltuminen alempiasteisen tieverkon parantamistoimenpiteeksi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 123 s. + liitt. 48 s. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/80706635.pdf>.

Hartikainen, O-P. (2007). Maarakennustekniikka. Otatieto. 196 s.

Hyttinen, N. (2017). Ferrokromin valmistus. Julkaisematon esitysmateriaali. Outokumpu. 35 s.

InfraRYL 2018: Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Päällys- ja pintarakenteet. (2018). Rakennustietosäätiö RTS.

Inkeröinen, J. & Alasaarela E. (toim). (2010). Uusiomateriaalin käyttö maarakentamisessa - Tuloksia UUMA-ohjelmasta 2006–2010. Ympäristöministeriön raportteja 13/2010. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41387/YMra_13_2010.pdf?sequence=1

Juvankoski, M. & Laaksonen, R. (2001). Sitomattomat tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalien käyttäytymisestä. TPPT – Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994-2001. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiehallinto. 73 s.

Kalliainen, A., Luomala, H. Jäniskangas T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf.

Kallio, V., Holappa, T. & Tikkakoski, A. (2010). OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamisohje tie-, katu- ja maarakentamisessa. Outokumpu. 44 s.

Kervinen, J-P. (2005). EU:n ainoa kromikaivos painuu maan alle. Tekniikka & Talous. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): <https://www.tekniikkatalous.fi/arkisto/2005-10-07/EUn-ainoa-kromikaivos-painuu-maan-alle-3263145.html>.

KHO 2005:90. (2005). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/oikeus/kho/vuosikirjat/2005/200503502>.

Kolisoja, P. (1993). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laitos, julkaisu 24, 147 s.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Dissertation. University of Technology. 188 p.

Kolisoja, P. (2016). Tie- ja katurakenteen suunnittelu. Luentokalvot. Tampereen teknillinen yliopisto.

Kolisoja, P. (2017). Uusiomaarakentamisen erikoisopintojakso. Luentokalvot 23.11.2017. Tampereen teknillinen yliopisto.

Koppa, T. (2018). Pudotuspainolaitteen ja levykuormituskokeen vertailu. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 118 s. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttty-201802201271>.

Koskinen, R. (2014) Sukeltajan vasaran isku paljasti kromiesiintymän – Kemin kaivos 50 vuotta. YLE Uutiset. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): <https://yle.fi/uutiset/3-7473807>.

Laaksonen, R., Kivikoski, H., Pienimäki, M., Korkiala-Tanttu, L. & Törnqvist, J. (2004). Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa - Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004. 63 s. + liitt. 40 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf/3200907-v-deformaation_hallinta.pdf.

Laitinen, A. (1990). Murskeen kantavuusominaisuudet. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 79 s.

Liikennevirasto. (2018). Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. 127 s. + liitt. 7 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf.

Liimatainen, A., Belt, J. & Ehrola, E. (1989). Rakentamisen aikaisen jyräyksen ja liikenteen vaikutus sitomattomiin päällysrakennekerroksiin: Effects of rolling and traffic on unbound layers of pavement structure. Oulun yliopisto. 52 s.

Lätti, E. (2015). Vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 134 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201511251807>.

Mosorin, P. (2018). Toimitusjohtaja, Plaana Oy. Haastattelu puhelimitse 14.11.2018.

Mustaniemi, J. (2017). Tuotepäällikkö, Destia Oy. Sanna Torniaisen diplomityötä varten tekemän haastattelun aineistot, haastattelu tehty 31.10.2017.

Mustaniemi, J. (2018). OKTO®-rakennustuotteet. Uusiomaarakentamisen erikoisopintojakso. Luentokalvot 10.4.2018. Tampereen teknillinen yliopisto.

Oulun kaupunki. (2017). Katurakenteiden suunnitteluohje. Saatavissa: https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778.

Paikkatietoikkuna. (2018). Maanmittauslaitos. Saatavissa (viitattu 28.10.2018): <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. (1997). Geotekniikka. Otatieto. 307 s.

Roadex. (2019). 4.1.9. Pudotuspainolaite (PPL) ja kevyt pudotuspainolaite. Saatavissa (viitattu 3.1.2019): https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvät-muodonmuutokset/4-tutkimus-ja-mittaustekniikat/#4_1_9.

SFS 5904. (2004). Terästeollisuuden kuonatuotteet maa- ja tierakennuskäyttöön. Sitomattomat seokset. Suomen standardisoimisliitto SFS. 6 s.

SFS-EN 13286-7. (2004). Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 7: Syklinen kolmiaksaalikoe sitomattomia kiviainesseoksia varten. Suomen standardisoimisliitto SFS. 39 s.

SFS-EN 13286-2. (2011). Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction. Suomen standardisoimisliitto SFS. 31 p.

Siika, T. (2006). Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus. Insinööritoimisto EV-TEK-ammattikorkeakoulu. 98 s. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2006/2006_4.pdf.

Sivonen M. & Karjalainen N. (2017). Mt 922 Kromitien parantaminen Thurevikinkadun ja Koskenrannantien liittymien kohdalla, Tornio, R9/2 Geotekninen suunnitteluraportti 31.10.2017, Ramboll Oy.

Sormunen, A. (2017). Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures. Dissertation. Tampere University of Technology. 93 p. + app. 60 p. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/12989408/sormunen_1503.pdf.

Spoof, H. & Petäjä, S. (2000a). Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta. TPPT Menetelmäkuvaus. VTT. 18 s.

Spoof, H. & Petäjä, S. (2000b). Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). TPPT Menetelmäkuvaus. VTT. 17 s.

Suomen kuntatekniikan yhdistys. (2003). Katu 2002 – Katusuunnittelun ja -rakentamisen ohjeet. Gummerus Kirjapaino Oy. 281 s.

Sweere, G.T.H. 1990. Unbound granular bases for roads. Dissertation. Delft University of Technology. 384 p.

Tiehallinto. (2004). Tierakenteen suunnittelu (TIEH 2100029-04). Tiehallinto. 74 s. Saatavissa: <https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>.

Tiehallinto. (2017). Sivutuotteiden käyttö maarakentamisessa. Tiehallinto. 80 s. Saatavissa: <https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>.

Troxler Model 3440. (2009). Manual of Operation and Instruction. Model 3440 - Surface Moisture-Density Gauge. Troxler Electronic Laboratories, Inc. 210 p. Saatavissa: <https://www.troxlerlabs.com/downloads/pdfs/3440/3440manual.pdf>.

Turpeinen, J. & Parantala, S. (2017a). Kromitien parantaminen Thurevikinkadun ja Koskenrannantien liittymien kohdalla, Tornio, R4/4-1 J1-pituusleikkaus 31.10.2017, Ramboll Oy.

Turpeinen, J. & Parantala, S. (2017b). Kromitien parantaminen Thurevikinkadun ja Koskenrannantien liittymien kohdalla, Tornio, Suunnitelmakartta M1, plv 32-410 31.10.2017, Ramboll Oy.

UUMA3. (2019). Tutkittua tietoa uusiomateriaalien käytöstä maarakentamisessa. Saatavissa (viitattu 22.4.2019): <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/>.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, VNA 7.12.2017/843 (MARA-asetus). (2017). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>.

Ylimaunu J., Parviainen, T. & Yli-Pekkala, J. (2011) OKTO-kiviainestuotteet. Outokumpu Oy.

LIITE A: KOERAKENTEIDEN KUORMITUSKESTÄVYYS- JA ROUTAMITOITUS

Mitoitusroutansyvyys S [m]:		2,0 [m]					
Vaatimusluokka:	K1						
Kuormitusluokka:	erillinen JP-tie, AB						
Alusrakenneluokka:	tH						
Rakenne (tyyppi):	erillinen JP-tie, AB; K1 - 2000						
Rakenne (pituus):	tH-1590-						
Huom!	HK1-koerakenneseos, J1, pl 0-20						
Kerros	Materiaali	R _i [m]	a _i	t[%]	n	E[MN/m ²]	E
Päällyste	AB 11	0,04	1,00	0	0	2500	164
Kantava	KaM 0-32 + 0-56	0,25	0,90	0	6	280	139
Suodatinkerros	Hk	1,30	0,90	0	6	70	69
(suodatinkangas N3)							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20

RN _{lask}	68 [mm]	RN _{sall}	70 [mm]		55 [mm]	RN _{sall}	70 [mm]
Rakennekerrosten paksuus	1,59 [m]				1,14 [m]		
Kantavuus päällysteen päältä	164 [MN/m ²]	E _{vaad}	100 [MN/m ²]		186 [MN/m ²]	E _{vaad}	100 [MN/m ²]
Kantavuus kantavan päältä	139 [MN/m ²]	E _{vaad}	85 [MN/m ²]		159 [MN/m ²]	E _{vaad}	85 [MN/m ²]

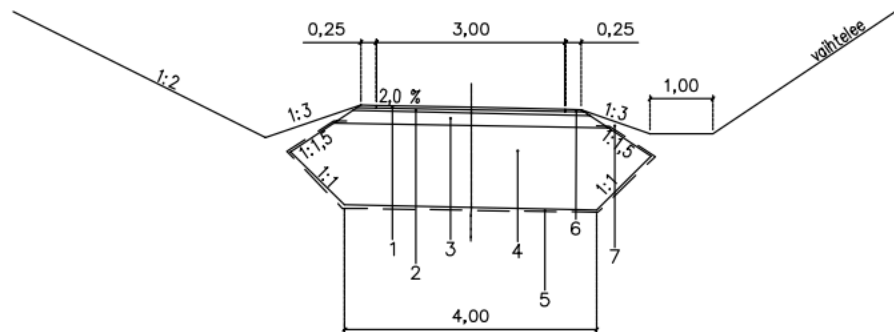
Mitoitusroutansyvyys S [m]:		2,0 [m]					
Vaatimusluokka:		K1					
Kuormitusluokka:		erillinen JP-tie, AB					
Alusrakenneluokka:		tH					
Rakenne (tyyppi/pl.):		erillinen JP-tie, AB; K1 - 2000					
Rakenne (pituus.):		tH-1290-					
Huom!		OKTO2-koerakenneosuus, J1, pl 190-210					
Kerros	Materiaali	R _i [m]	a _i	t [%]	n	E [MN/m ²]	E
Päällyste	AB 11	0,04	1,00	0	0	2500	190
Kantava	KaM 0-32 + 0-56	0,25	0,90	0	6	280	163
Eriste / Suodatin (tarvittaessa N3)	Okto	1,00	1,50	0	6	100	92
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
							20
Pohjamaan routapaisumiskerroin/kantavuus		12	20				
		[%]	[MN/m ²]				

K1						
erillinen JP-tie, AB						
tH						
erillinen JP-tie, AB; K1 - 2000						
tH-1740-						
HK2-koerakenneosuus, J1, pl 210-231						
Materiaali	R _i [m]	a _i	t [%]	n	E [MN/m ²]	E
AB 11	0,04	1,00	0	0	2500	164
KaM 0-32 + 0-56	0,25	0,90	0	6	280	139
Hk	1,45	1,00	0	6	70	69
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20
						20

RN _{lask}	28 [mm]	RN _{sall}	70 [mm]		34 [mm]	RN _{sall}	70 [mm]
Rakennekerrosten paksuus	1,29 [m]				1,74 [m]		
Kantavuus päällysteen päältä	190 [MN/m ²]	E _{vaad}	100 [MN/m ²]		164 [MN/m ²]	E _{vaad}	100 [MN/m ²]
Kantavuus kantavan päältä	163 [MN/m ²]	E _{vaad}	85 [MN/m ²]		139 [MN/m ²]	E _{vaad}	85 [MN/m ²]

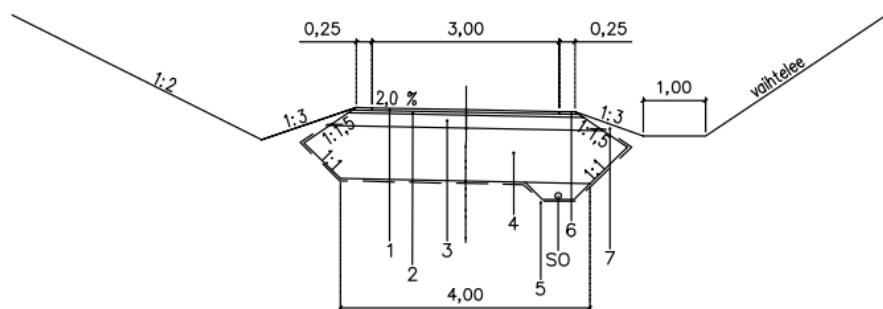
LIITE B: TYYPIPOIKKILEIKKAUKSET KOERAKENTEISTA

J1
Rakenteellinen tyyppipoikkileikkaus
pl 0–20



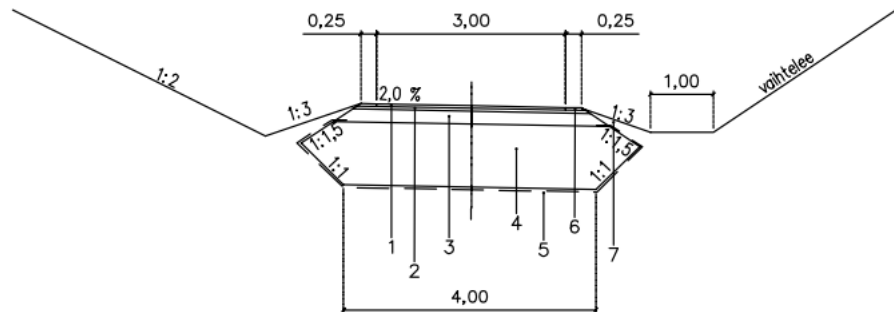
HK1–koerakenneosuus			
N:0	NIMITYS	MATERIAALI	1590–Hk
1	Päällystekerros	AB 11	40 mm
2	Profilointikerros	M 0–32	250 mm
3	Yhdistetty kantava ja jakava kerros	M 0–56	
4	Suodatinkerros	Hk (70 MPa)	1300 mm
5	Suodatinkangas	N3	
6	Piennartäyttö	M 0–16	
7	Luiskatäyttö	Vettä pidättävää materiaalia	

J1
Rakenteellinen tyyppipoikkileikkaus
pl 20–40



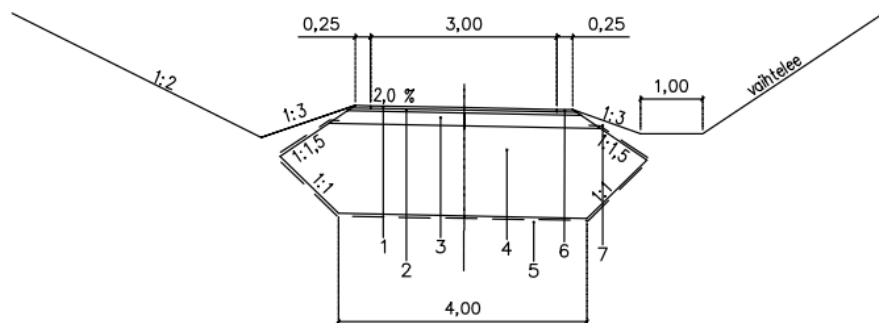
OKT01–koerakenneosuus			
N:0	NIMITYS	MATERIAALI	1140–Okto
1	Päällystekerros	AB 11	40 mm
2	Profilointikerros	M 0–32	250 mm
3	Yhdistetty kantava ja jakava kerros	M 0–56	
4	Suodatinkerros	OKTO	850 mm
5	Suodatinkangas	N3	
6	Piennartäyttö	M 0–16	
7	Luiskatäyttö	Vettä pidättävää materiaalia	

J1
Rakenteellinen tyypipoikkileikkaus
pl 190–210



OKT02-koerakenneosuus			
N:0	NIMITYS	MATERIAALI	1290-Okto
1	Päällystekerros	AB 11	40 mm
2	Profilointikerros	M 0-32	250 mm
3	Yhdistetty kantava ja jakava kerros	M 0-56	
4	Suodatinkerros	OKT0	1000 mm
5	Suodatinkangas	N3	
6	Piennartäyttö	M 0-16	
7	Luiskatäyttö	Vettä pidättävää materiaalia	

J1
Rakenteellinen tyypipoikkileikkaus
pl 210–231



HK2-koerakenneosuus			
N:0	NIMITYS	MATERIAALI	1740-Hk
1	Päällystekerros	AB 11	40 mm
2	Profilointikerros	M 0-32	250 mm
3	Yhdistetty kantava ja jakava kerros	M 0-56	
4	Suodatinkerros	Hk (70 MPa)	1450 mm
5	Suodatinkangas	N3	
6	Piennartäyttö	M 0-16	
7	Luiskatäyttö	Vettä pidättävää materiaalia	

LIITE C: KOERAKENTEISSA KÄYTETTYJEN MATERIAALIEN RAKEISUUSKÄYRÄT JA SUORITUSTASOILMOITUKSET



Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

RAKEISUUSTUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	Hk
Urakoitsija		Lajite	Suod/Hk
Paikka	LB/Konttikangas	Diaarinro	18/1613
Yhteyshenkilö	Juha Mustaniemi	Kasa	

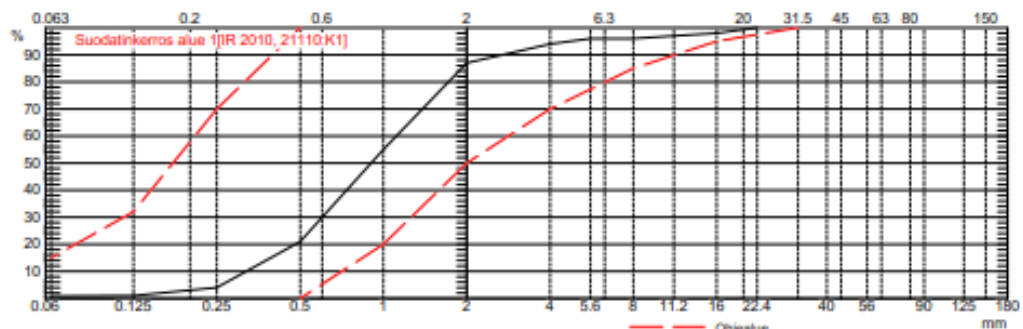
Näytetunnus	1
Näytteenottopvm	13.08.2018
Näytteenottaja	Asiakas

Seulontatapa	Pesuseulonta (SFS-EN 933-1:2012)
E-moduli [MPa]	70
Routivuus GEO	Routimaton
Routivuus TIEH-04	Routimaton

Kokeen nimi (Menetelmä) [Yksikkö]	Tulos
Vesipitoisuus (SFS-EN 1097-5:2008) [%]	1.91

Seulat mm	Ohjealue min	max	Läpäisy %
22.4			100
16			98
11.2			97
8			96
5.6			96
4			94
2			87
1			55
0.5	0	100	21
0.25		70	4
0.125		32	1
0.063		15.0	0.8

* Poikkeus ohjealueelta



Huomi! Testaustulos koskee ainoastaan testattua näytettä.

Jakelu	Juha Mustaniemi
--------	-----------------

Päiväys 14.08.2018

Allekirjoitus

Timo Haikonen

Haikonen Timo

PL 157
00521 Helsinki
Puhelin 08 5356 000
etunimi.sukunimi@mitta.fi


Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

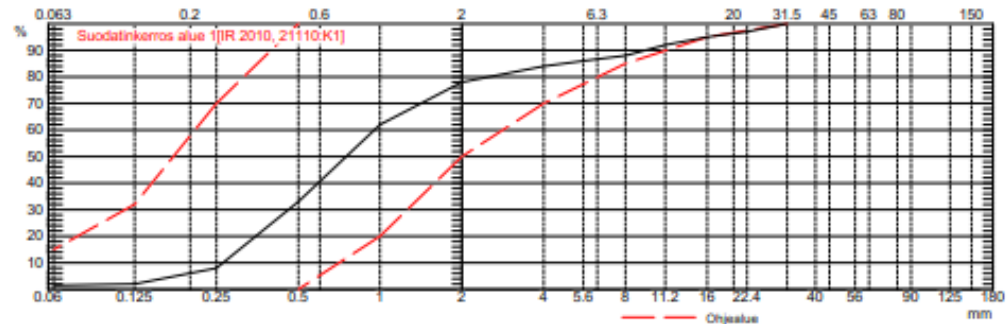
RAKEISUUSTUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	Hk
Urakoitsija		Lajite	Suod/Hk
Paikka	LB/Konttikangas	Diäärinro	18/1613
Yhteyshenkilö	Juha Mustaniemi	Kasa	

Näytetunnus	2
Näytteenottopvm	13.08.2018
Näytteenottaja	Asiakas
Seulonlatapa	Pesuseulonta (SFS-EN 933-1:2012)
E-moduli [MPa]	70
Routivuus GEO	Routimaton
Routivuus TIEH-04	Routimaton
Kokeen nimi (Menetelmä) [Yksikkö]	Tulos
Vesipitoisuus (SFS-EN 1097-5:2008) [%]	2.12

Seulat mm	Ohjealue min	max	Läpäisy %
31.5			100
22.4			97
16			95
11.2			92
8			88
5.6			86
4			84
2			78
1			62
0.5	0	100	33
0.25		70	8
0.125		32	2
0.063		15.0	1.5

* Poikkosa ohjeet



Huom! Testaustulos koskee ainoastaan testattua näytettä.

Jakelu	Juha Mustaniemi
--------	-----------------

Päiväys 14.08.2018

Allekirjoitus

Haikonen Timo

 PL 157
00521 Helsinki
Puhelin 08 5356 000
etunimi.sukunimi@mitta.fi

SUORITUSTASOILMOITUS

Nro: Ko-2/2017-KaM 0/32

1. Tuotteen yksilöivä tunniste
Kalliomurske 0/32 mm, Koiraanmäki
2. Aiottu käyttötarkoitus
Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävä sitomaton kiviaines
3. Valmistaja
4. KTK-Tornio Oy, Verkkotehtaankatu 11, 95420 Tornio, www.ktk-tornio.fi
5. AVCP-järjestelmä
AVCP 4
- 6a. Yhdenmukaistettu standardi: EN 13242:2002+A1:2007
7. Ilmoitettut suoritustasot

Perusominaisuudet	Suoritustaso	Yhdenmukaistettu tekninen asiakirja
Raekoko	0/32	EN 13242:2002+A1:2007
Rakeisuusluokka	G ₈₅	
Litteysluku	Fl ₂₀	
Kiintotiheys	2.81 ± 0,05 Mg/m ³	
Hienoaineksen määrä	f ₇	
Murskaantuneiden rakeiden määrä	NPD	
Iskunkestävyys	LA ₂₅	
Tilavuuden pysyvyys	NPD	
Vedenimeytyminen	WA ₂₄₁	
Petrografinen kuvaus	Diabaasinen kalliomurske	
Kulutuskestävyys	NPD	
Vaaralliset aineet	NPD	
Rapautumisen kestävyys	NPD	
Jäädytys-sulatuskestävyys	NPD	

Tyyppirakeisuus ja sen poikkeamat: rakeisuuskäyrän voi pyytää kiviaineksen valmistajalta

Edellä yksilöidyn tuotteen suoritustaso on ilmoitettujen suoritustasojen joukon mukainen. Tämä suoritustasoilmoitus on asetuksen (EU) N:o 305/2011 mukaisesti annettu edellä ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:

paikka ja päivämäärä

Jukka Vähä, toimitusjohtaja



17

KTK-Tornio Oy, Verkkotehtaankatu 11, 95420 Tornio

Suoritusasoilmoitus: Ko-2/2017-KaM 0/32

SFS-EN 13242 maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät
sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset

Koiraanmäki KaM 0/32

Perusominaisuudet	Suoritusaso
Raekoko	0/32
Rakeisuusluokka	G _A 85
Litteysluku	FI ₂₀
Kiintotiheys	2.81 ± 0,05 Mg/m ³
Hienoaineksen määrä	f ₇
Murskaantuneiden rakeiden määrä	NPD
Iskunkestävyys	LA ₂₅
Tilavuuden pysyvyys	NPD
Vedenimeytyminen	WA ₂₄ 1
Petrografinen kuvaus	Diabaasinen kalliomurske
Kulutuskkestävyys	NPD
Vaaralliset aineet	NPD
Rapautumisen kestävyys	NPD
Jäädytys-sulatuskestävyys	NPD

SUORITUSTASOILMOITUS

Nro: Ko-2/2017-KaM 0/56

1. Tuotteen yksilöivä tunniste
Kalliomurske 0/56 mm, Koiraanmäki
2. Aiottu käyttötarkoitus
Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävä sitomaton kiviaines
3. Valmistaja
4. KTK-Tornio Oy, Verkkotehtaankatu 11, 95420 Tornio, www.ktk-tornio.fi
5. AVCP-järjestelmä
AVCP 4
- 6a. Yhdenmukaistettu standardi: EN 13242:2002+A1:2007
7. Ilmoitetut suoritustasot

Perusominaisuudet	Suoritustaso	Yhdenmukaistettu tekninen asiakirja
Raekoko	0/56	EN 13242:2002+A1:2007
Rakeisuusluokka	G _A 85	
Litteysluku	Fl ₃₅	
Kiintotiheys	2.81 ± 0,05 Mg/m ³	
Hienoaineksen määrä	f ₅	
Murskaantuneiden rakeiden määrä	NPD	
Iskunkestävyys	LA ₂₅	
Tilavuuden pysyvyys	NPD	
Vedenimeytyminen	WA ₂₄ 1	
Petrografinen kuvaus	Diabaasinen kalliomurske	
Kulutuskestävyys	NPD	
Vaaralliset aineet	NPD	
Rapautumisen kestävyys	NPD	
Jäädytys-sulatuskestävyys	NPD	

Tyyppirakeisuus ja sen poikkeamat: rakeisuuskäyrän voi pyytää kiviaineksen valmistajalta

Edellä yksilöidyn tuotteen suoritustaso on ilmoitettujen suoritustasojen joukon mukainen. Tämä suoritustasoilmoitus on asetuksen (EU) N:o 305/2011 mukaisesti annettu edellä ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:

paikka ja päivämäärä

Jukka Vähä, toimitusjohtaja



17

KTK-Tornio Oy, Verkkotehtaankatu 11, 95420 Tornio

Suoritustasoilmoitus: Ko-2/2017-KaM 0/56

SFS-EN 13242 maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät
sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset

Koiraanmäki KaM 0/56

Perusominaisuudet	Suoritustaso
Raekoko	0/56
Rakeisuusluokka	G _A 85
Litteysluku	Fl ₃₂
Kiintotiheys	2.81 ± 0,05 Mg/m ³
Hienoaineksen määrä	f ₅
Murskaantuneiden rakeiden määrä	NPD
Iskunkestävyys	LA ₂₅
Tilavuuden pysyvyys	NPD
Vedenimeytyminen	WA ₂₄ 1
Petrografinen kuvaus	Diabaasinen kalliomurske
Kulutuskkestävyys	NPD
Vaaralliset aineet	NPD
Rapautumisen kestävyys	NPD
Jäädytys-sulatuskestävyys	NPD

LIITE D: PROCTOR-TUTKIMUSTEN TULOKSET



Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

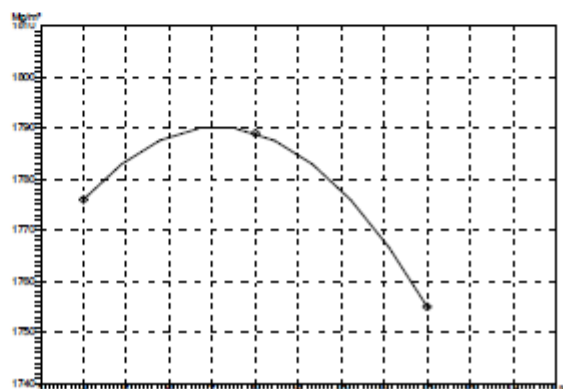
TUTKIMUSSELOSTUS - PROCTOR-TUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	Hk
Urakoitsija		Lajite	Hk
Pailka	Kromitie	Diariinro	18/1718
Yhteyshenkilö	Laura Raerinne	Kasa	

Näytetunnus	1
-------------	---

Kokeen nimi	Menetelmä	Tulos
Proctor-koe	SFS-EN 13286-2:2011	1790.173 Mg/m ³ w = 7.11 %

Maksimi kuivaintiheys [Mg/m ³]	1790.173
Optimivesipitoisuus [%]	7.11
Maksimi kuivaintiheys, korj. [Mg/m ³]	1790.173
Optimivesipitoisuus, korj. [%]	7.11



Jakelu	laura.raerinne@destia.fi, juha.mustaniemi@destia.fi
--------	---

Päiväys 23.08.2018

Allekirjoitus

Tuomas Pohjola

Oulun laboratorio
Typpitie 1
90620 Oulu
etunimi.sukunimi@mitta.fi


Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

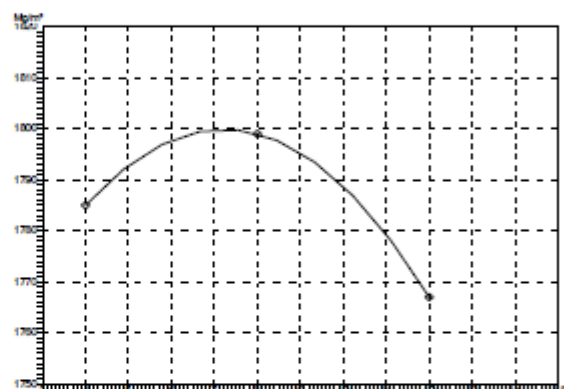
TUTKIMUSSELOSTUS - PROCTORITUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	Hk
Urakoitsija		Lajite	Hk
Paiikka	Kromitie	Diariinro	18/1718
Yhteyshenkilö	Laura Raerinne	Kasa	

Näytetunnus	2
-------------	---

Kokeen nimi	Menetelmä	Tulos
Proctor-koe	SFS-EN 13286-2:2011	1799.880 Mg/m ³ w = 7.22 %

Maksimi kuivaintiheys [Mg/m ³]	1799.880
Optimivesipitoisuus [%]	7.22
Maksimi kuivaintiheys, korj. [Mg/m ³]	1799.880
Optimivesipitoisuus, korj. [%]	7.22



Jakelu	laura.raerinne@destia.fi, juha.mustaniemi@destia.fi
--------	---

Päiväys 23.08.2018

Allekirjoitus

Tuomas Pohjola

 Oulun laboratorio
 Tyypitie 1
 90620 Oulu

etunimi.sukunimi@mitta.fi


Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

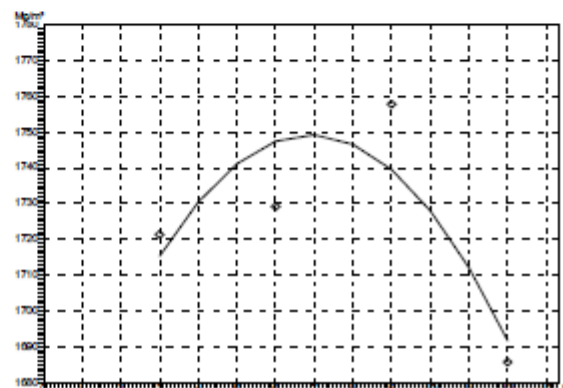
TUTKIMUSSELOSTUS - PROCTORTUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	OKTO
Urakoitsija		Lajite	OKTO
Paikka	Kromitie	Diaarinro	18/1718
Yhteyshenkilö	Laura Raerinne	Kasa	

Näytetunnus	1	Näytteenottopvm	24.08.2018
-------------	---	-----------------	------------

Kokeen nimi	Menetelmä	Tulos
Proctor-koe	SFS-EN 13286-2:2011	1749,265 Mg/m ³ w = 6,91 %

Maksimi kuivainpitoisuus [Mg/m ³]	1749,265
Optimivesipitoisuus [%]	6,91
Maksimi kuivainpitoisuus, korj. [Mg/m ³]	1749,265
Optimivesipitoisuus, korj. [%]	6,91



Jakelu	laura.raerinne@destia.fi, juha.mustaniemi@destia.fi
--------	---

Päiväys 24.08.2018

Allekirjoitus

Tuomas Pohjola

 Oulun laboratorio
 Typpitie 1
 90620 Oulu

etunimi.sukunimi@mitta.fi

Mitta-1625-02-34025(O) Mitta


Laboratoriopalvelut

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Laboratoriopalveluita vuodesta 1951

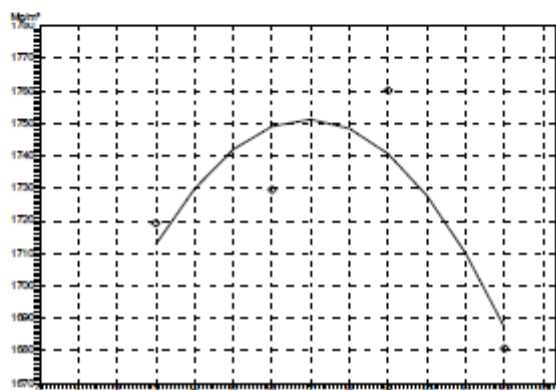
TUTKIMUSSELOSTUS - PROCTORTUTKIMUS

Asiakas	Destia Oy	Kunta	
Projekti	Destia Oy	Materiaali	OKTO
Urakoitsija		Lajite	OKTO
Paikka	Kromitie	Diaarinro	18/1718
Yhteyshenkilö	Laura Raerinne	Kasa	

Näytetunnus	2	Näytteenottopvm	24.08.2018
-------------	---	-----------------	------------

Kokeen nimi	Menetelmä	Tulos
Proctor-koe	SFS-EN 13286-2:2011	1751.256 Mg/m ³ w = 6.93 %

Maksimi kuivairtoheys [Mg/m ³]	1751.256
Optimivesipitoisuus [%]	6.93
Maksimi kuivairtoheys, korj. [Mg/m ³]	1751.256
Optimivesipitoisuus, korj. [%]	6.93



Jakelu	laura.raerinne@destia.fi, juha.mustaniemi@destia.fi
--------	---

Päiväys 24.08.2018

Allekirjoitus

Tuomas Pohjola

 Oulun laboratorio
 Typpitie 1
 90620 Oulu
 etunimi.sukunimi@mitta.fi

Mitta-15025-0234025/C Mit

LIITE E: HIEKKAVOLYMETRIKOEIDEN TULOKSET

Rakennetyyppi	Mittauspisteen paaluluku	DD (kg/m ³)	Tiiviyysaste (%)	Vesipitoisuus (w-%)
HK1	3	1583	88,2	2,3
	5	1566	87,2	3,2
	7	1579	88,0	2,0
	9	1608	89,6	1,7
	11	1558	86,8	3,6
	13	1606	89,5	2,1
OKTO1	23	1447	82,7	2,7
	26	1644	93,9	2,7
	28	1653	94,5	2,7
	29	1632	93,3	2,7
	31	1651	94,3	2,3
	35	1657	94,7	2,0
OKTO2	192	1482	84,7	2,9
	194	1416	80,9	3,1
	196	1488	85,0	3,6
	198	1388	79,3	3,5
	200	1388	79,3	3,5
	202	1388	79,3	3,6
HK2	215	1612	89,8	2,2
	217	1565	87,2	2,3
	219	1457	81,2	2,6
	220	1459	81,3	1,7
	223	1490	83,0	1,8
	225	1467	81,7	2,0

LIITE F: TROXLER-MITTAUSTEN TULOKSET

Rakennetyyppi	Mittauspisteen paaluluku	DD (kg/m ³)	Tiiviysaste (%)	Vesipitoisuus (w-%)
HK1	3	1583	88,2	2,3
	5	1566	87,2	3,2
	7	1579	88,0	2,0
	9	1608	89,6	1,7
	11	1558	86,8	3,6
	13	1606	89,5	2,1
OKTO1	23	1447	82,7	2,7
	26	1644	93,9	2,7
	28	1653	94,5	2,7
	29	1632	93,3	2,7
	31	1651	94,3	2,3
	35	1657	94,7	2,0
OKTO2	192	1482	84,7	2,9
	194	1416	80,9	3,1
	196	1488	85,0	3,6
	198	1388	79,3	3,5
	200	1388	79,3	3,5
	202	1388	79,3	3,6
HK2	215	1612	89,8	2,2
	217	1565	87,2	2,3
	219	1457	81,2	2,6
	220	1459	81,3	1,7
	223	1490	83,0	1,8
	225	1467	81,7	2,0

LIITE G: SUODATINKERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN LEVYKUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET

Levykuormituskoetulokset HK1-koerakenteen suodatinkerroksen pinnalta							
1. kuormitus		Painuma (mm/100) eri mittauspisteillä					
Kuorma (kN)	Jännitys (kPa)	PL2	PL4	PL6	PL8	PL10	PL12
0	0	0	0	0	0	0	0
10	141	75	40	50	65	45	55
20	283	270	280	175	235	205	250
30	424	490	455	360	470	410	535
40	566	720	700	595	735	655	930
50	707	1030	1000	920	1010	970	--
60	849	--	--	--	--	--	--

Levykuormituskoetulokset OKTO1-koerakenteen suodatinkerroksen pinnalta							
1. kuormitus		Painuma (mm/100) eri mittauspisteillä					
Kuorma (kN)	Jännitys (kPa)	PL23	PL25	PL27	PL29	PL31	PL33
0	0	0	0	0	0	0	0
10	141	50	50	60	40	50	45
20	283	225	240	220	235	270	335
30	424	445	470	455	455	540	715
40	566	690	740	725	750	900	--
50	707	990	--	1000	--	--	--
60	849	--	--	--	--	--	--

Levykuormituskoetulokset OKTO1-koerakenteen suodatinkerroksen pinnalta							
1. kuormitus		Painuma (mm/100) eri mittauspisteillä					
Kuorma (kN)	Jännitys (kPa)	PL193	PL195	PL197	PL199	PL201	PL203
0	0	0	0	0	0	0	0
10	141	90	60	70	75	95	90
20	283	420	440	475	530	680	750
30	424	740	1040	955	1030	--	--
40	566	--	--	--	--	--	--
50	707	--	--	--	--	--	--
60	849	--	--	--	--	--	--

Levykuormituskoetulokset HK2-koerakenteen suodatinkerroksen pinnalta							
1. kuormitus		Painuma (mm/100) eri mittauspisteillä					
Kuorma (kN)	Jännitys (kPa)	PL218	PL220	PL222	PL224	PL226	PL228
0	0	0	0	0	0	0	0
10	141	75	110	70	90	70	106
20	283	690	700	640	730	650	935
30	424	--	--	--	--	--	--
40	566	--	--	--	--	--	--
50	707	--	--	--	--	--	--
60	849	--	--	--	--	--	--

LIITE H: KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN LEVYKUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET

Mittaajalta saatuihin levykuormituskoetulosten tiedostoihin oli jäänyt aiemman kohteen rakennepaksuuskerros (140 mm) todellisen rakennekerrospaksuuden (200 mm) sijaan.



07/xxx

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 2	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

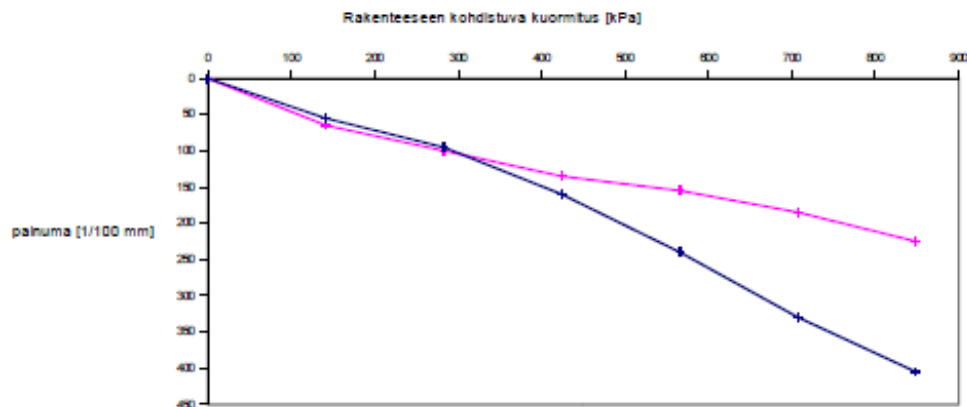
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	65
20	283	95	20	283	100
30	424	160	30	424	135
40	566	240	40	566	155
50	707	330	50	707	185
60	849	405	60	849	225



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	47,2
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	84,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,8

07/xxx

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 4	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

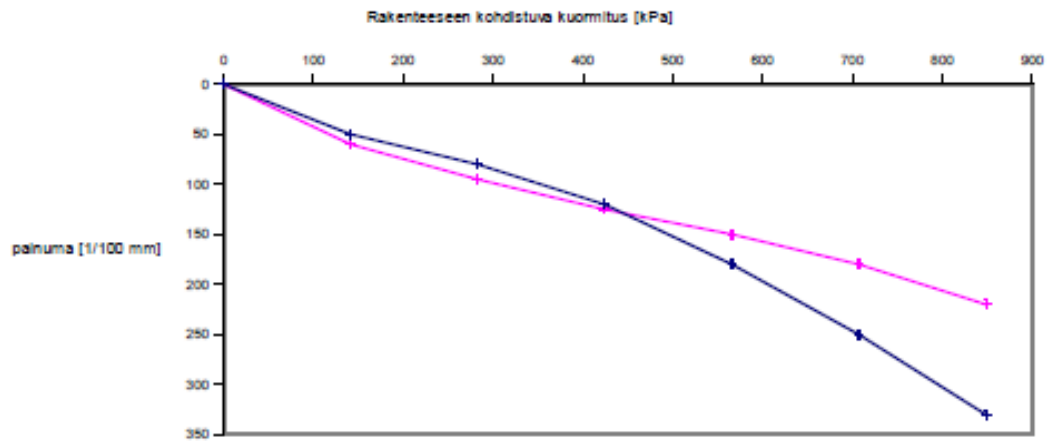
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	50	10	141	60
20	283	80	20	283	95
30	424	120	30	424	125
40	566	180	40	566	150
50	707	250	50	707	180
60	849	330	60	849	220



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	57,9
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	86,8
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,5

07/xxx

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 6	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

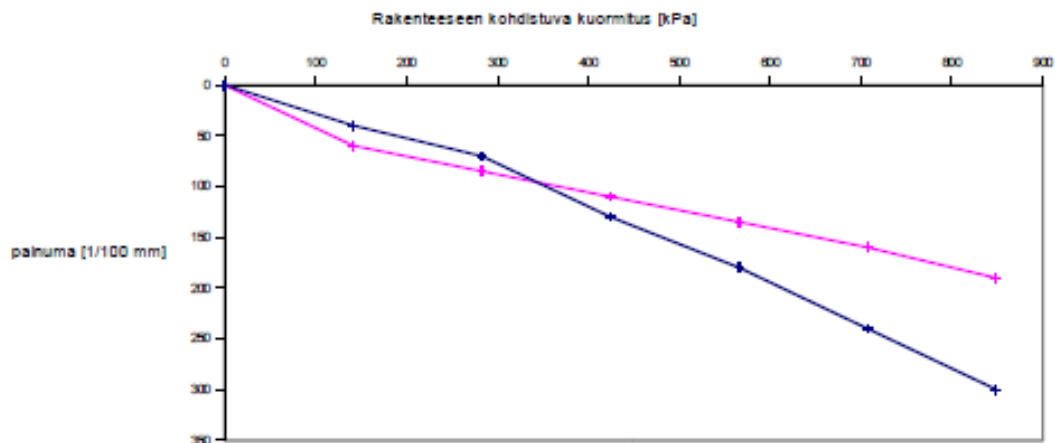
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	40	10	141	60
20	283	70	20	283	85
30	424	130	30	424	110
40	566	180	40	566	135
50	707	240	50	707	160
60	849	300	60	849	190



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	63,7
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	100,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,6

07/xxx

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 8	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

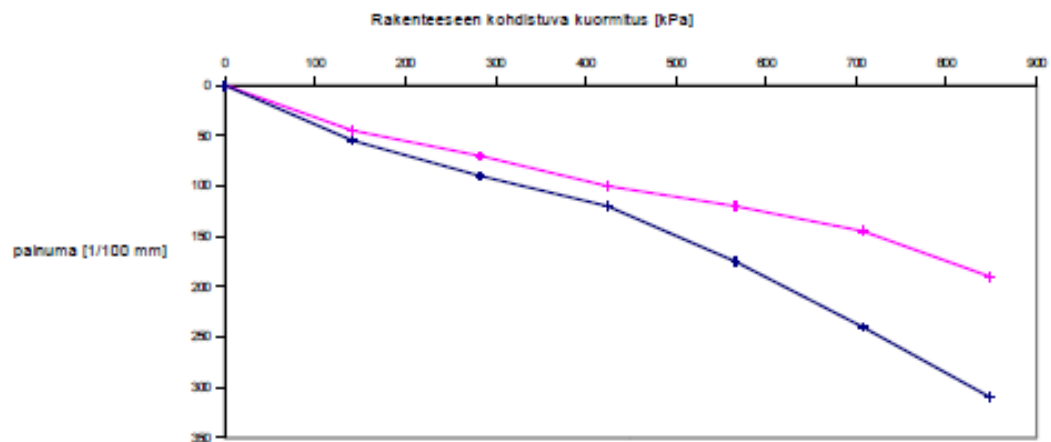
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	45
20	283	90	20	283	70
30	424	120	30	424	100
40	566	175	40	566	120
50	707	240	50	707	145
60	849	310	60	849	190



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

$$D = \text{levyn halkaisija [mm]}$$

$$\delta = \text{jännitys [MPa]}$$

$$\Delta s = \text{painuma [mm]}$$

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		$E_1 [\text{Mpa/m}^2]$	61,6
$E_2 \geq$		$E_2 [\text{Mpa/m}^2]$	100,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,6

07/xxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 10	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

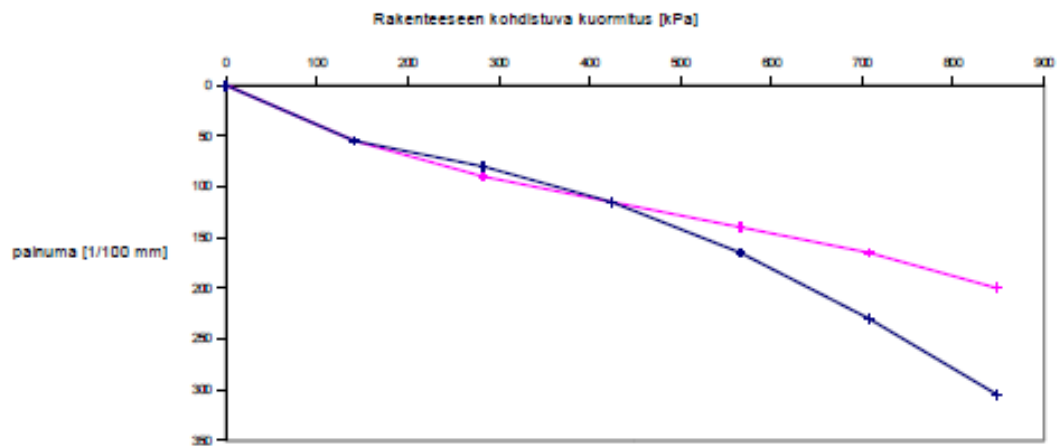
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	55
20	283	80	20	283	90
30	424	115	30	424	115
40	566	165	40	566	140
50	707	230	50	707	165
60	849	305	60	849	200



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	62,6
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	95,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,5

07/xxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 12	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

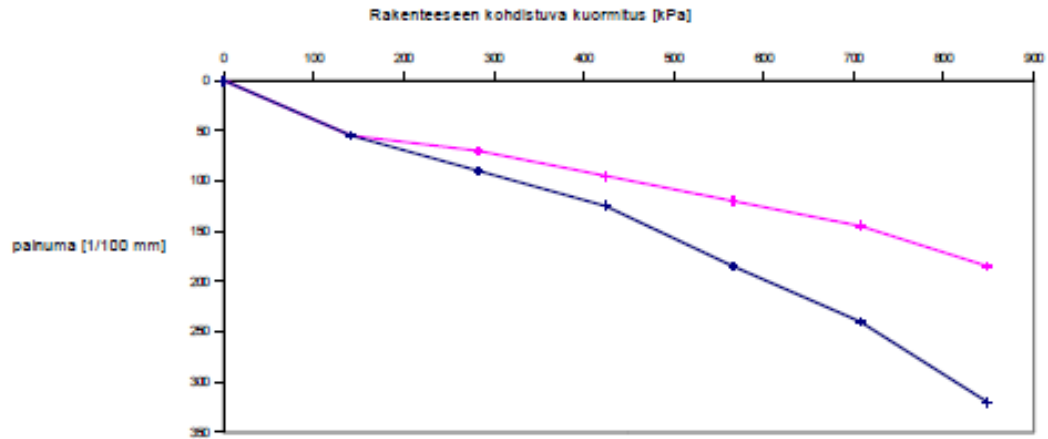
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	55
20	283	90	20	283	70
30	424	125	30	424	95
40	566	185	40	566	120
50	707	240	50	707	145
60	849	320	60	849	185



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	59,7
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	103,2
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,7

07/xxx

Tilaaaja	DESTIA
rakennuskohde	Kromitie pyörätie
tiivistyskohde	MURSKE
piste nro / paalu	PL 23
	taso

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

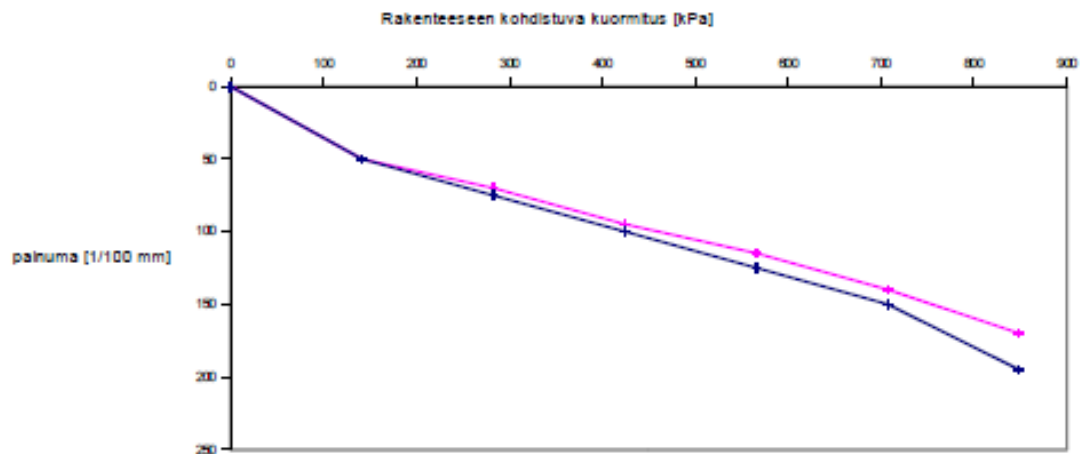
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	50	10	141	50
20	283	75	20	283	70
30	424	100	30	424	95
40	566	125	40	566	115
50	707	150	50	707	140
60	849	195	60	849	170



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	97,9
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	112,3
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,1

07/xxxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKKE		
piste nro / paalu	PL 25	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

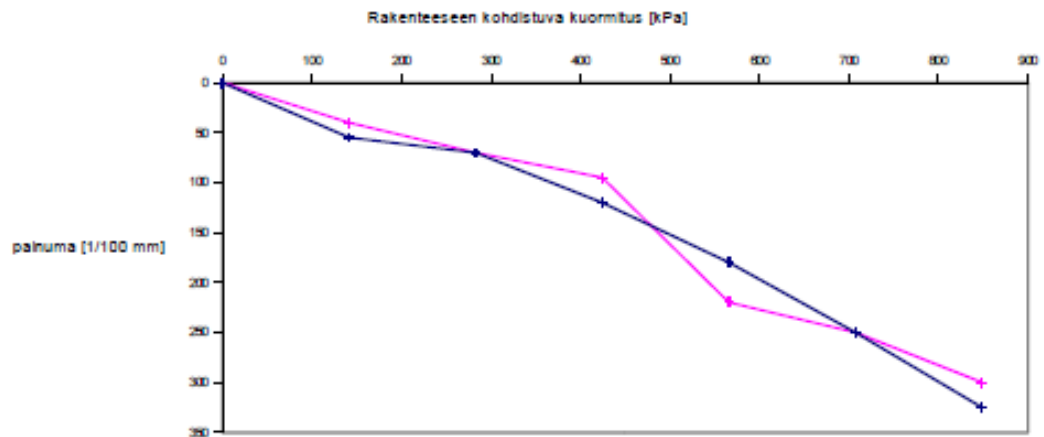
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 80 kN	80

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	40
20	283	70	20	283	70
30	424	120	30	424	95
40	566	180	40	566	220
50	707	250	50	707	250
60	849	325	60	849	300



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	58,8
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	63,7
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,1

07/xxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 27	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

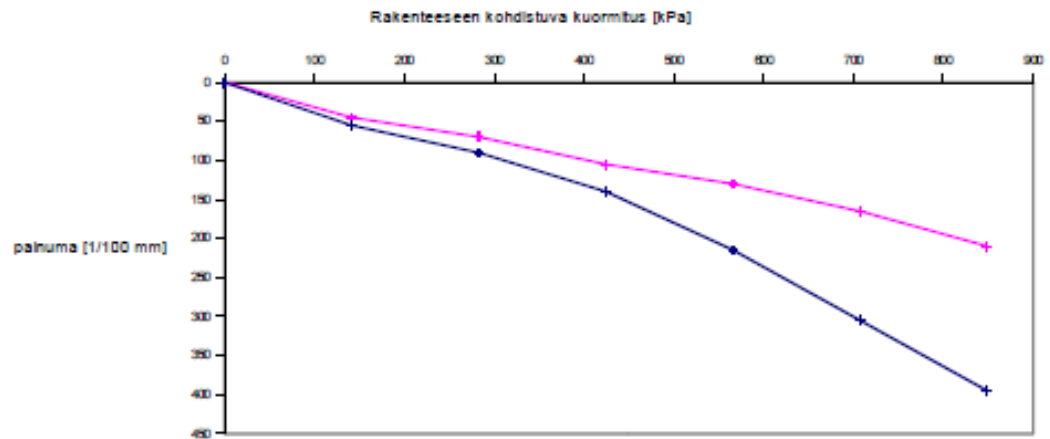
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	45
20	283	90	20	283	70
30	424	140	30	424	105
40	566	215	40	566	130
50	707	305	50	707	165
60	849	395	60	849	210



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	48,4
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	90,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,9

07/xxxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 29	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

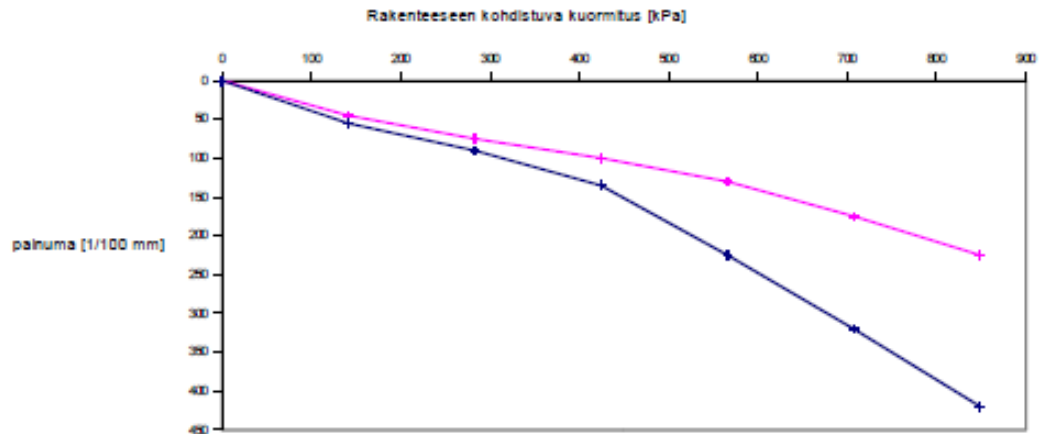
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	45
20	283	90	20	283	75
30	424	135	30	424	100
40	566	225	40	566	130
50	707	320	50	707	175
60	849	420	60	849	225



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	45,5
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	84,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,9

07/xxx

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 31	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

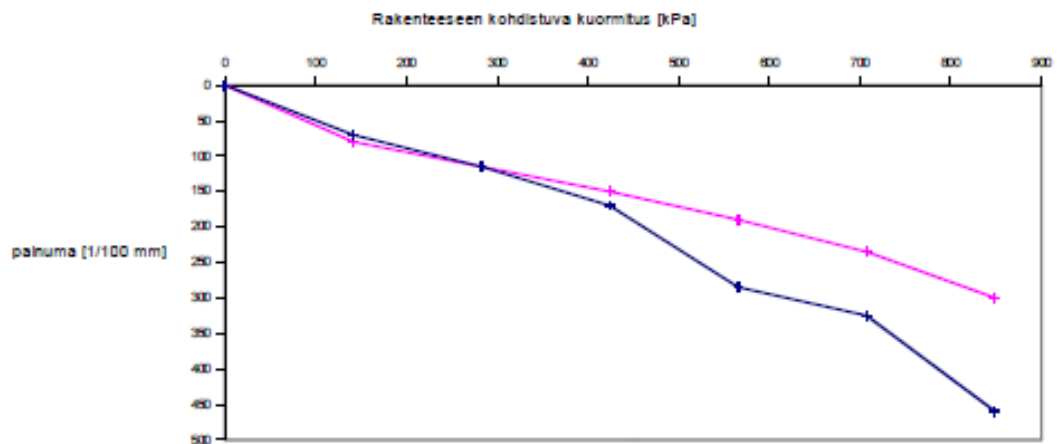
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	70	10	141	80
20	283	115	20	283	115
30	424	170	30	424	150
40	566	285	40	566	190
50	707	325	50	707	235
60	849	460	60	849	300



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	41,5
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	63,7
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,5

07/xxx

Tilaaja	DESTIA
rakennuskohde	Kromitie pyörätie
tiivistyskohde	MURSKKE
piste nro / paalu	PL 33
	taso

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

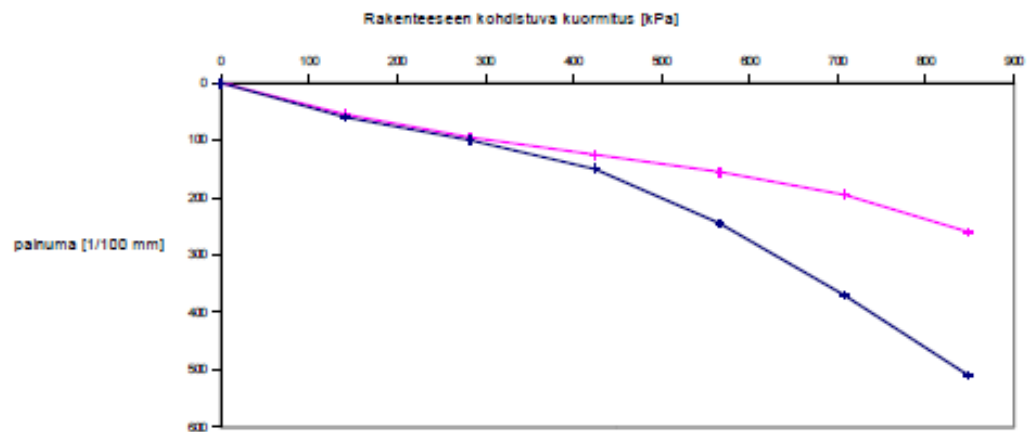
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	9
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl/Mhe
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	60	10	141	55
20	283	100	20	283	95
30	424	150	30	424	125
40	566	245	40	566	155
50	707	370	50	707	195
60	849	510	60	849	260



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \hat{\sigma}) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

$\hat{\sigma}$ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	37,4
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	73,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,0

22.08.18

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 193	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

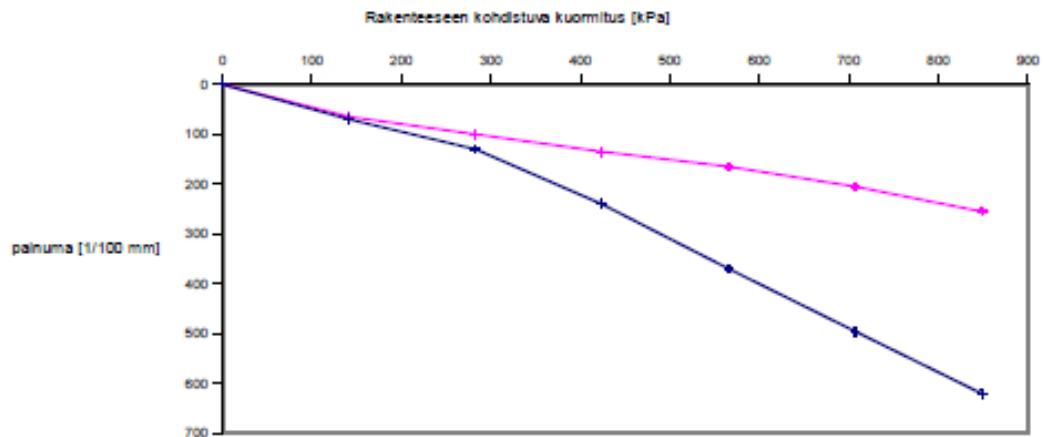
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	70	10	141	65
20	283	130	20	283	100
30	424	240	30	424	135
40	566	370	40	566	165
50	707	495	50	707	205
60	849	620	60	849	255



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	30,8
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	74,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,4

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 195	tas	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

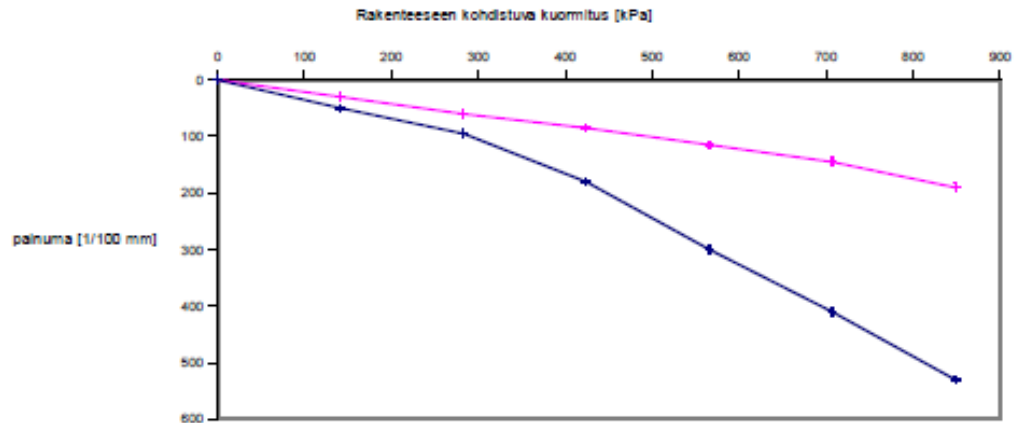
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	50	10	141	30
20	283	95	20	283	60
30	424	180	30	424	85
40	566	300	40	566	115
50	707	410	50	707	145
60	849	530	60	849	190



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

$$D = \text{levyn halkaisija [mm]}$$

$$\delta = \text{jännitys [MPa]}$$

$$\Delta s = \text{painuma [mm]}$$

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		$E_1 [\text{Mpa/m}^2]$	36,0
$E_2 \geq$		$E_2 [\text{Mpa/m}^2]$	100,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,8

22.08.18

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 197	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

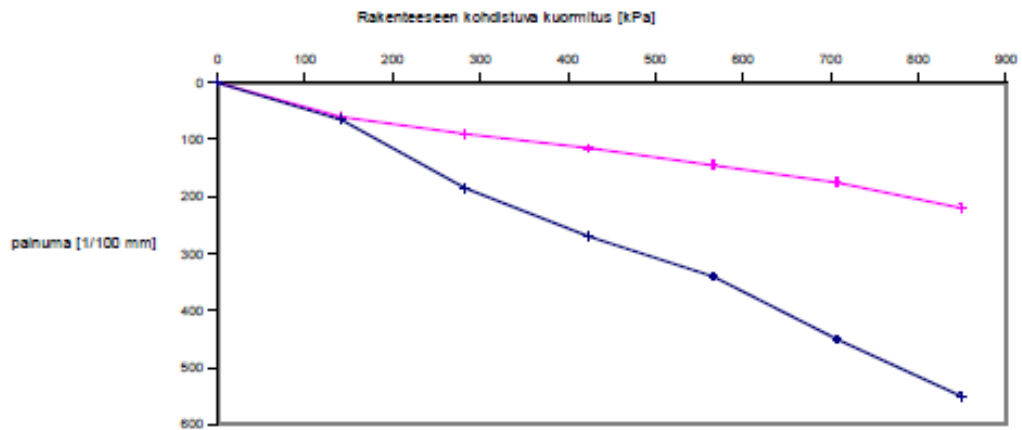
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	65	10	141	60
20	283	185	20	283	90
30	424	270	30	424	115
40	566	340	40	566	145
50	707	450	50	707	175
60	849	550	60	849	220



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	34,7
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	86,8
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,5

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 199	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

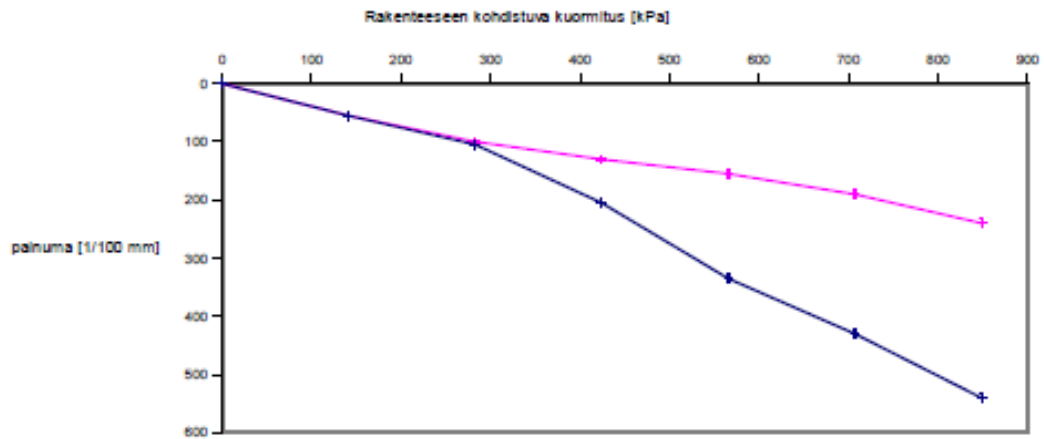
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	55	10	141	55
20	283	105	20	283	100
30	424	205	30	424	130
40	566	335	40	566	155
50	707	430	50	707	190
60	849	540	60	849	240



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]
 δ = jännitys [MPa]
 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	35,4
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	79,6
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,3

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 201	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

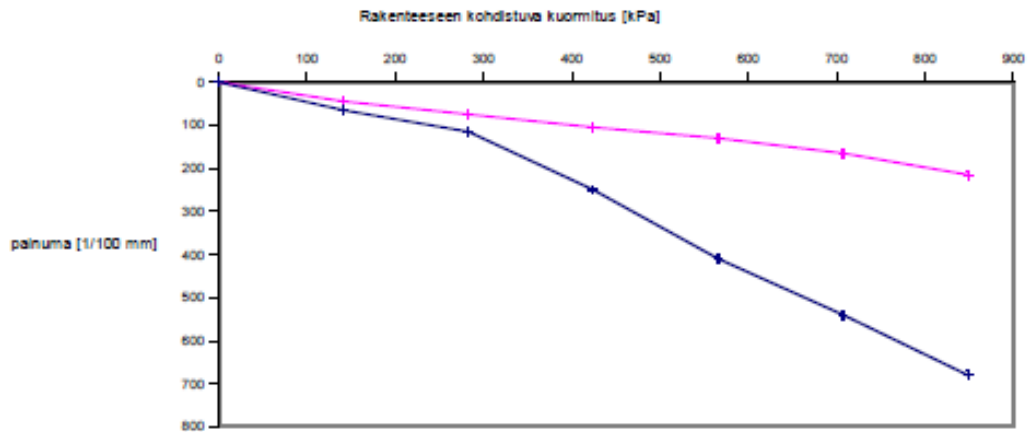
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	65	10	141	45
20	283	115	20	283	75
30	424	250	30	424	105
40	566	410	40	566	130
50	707	540	50	707	165
60	849	680	60	849	215



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

 D = levyn halkaisija [mm]

 δ = jännitys [MPa]

 Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	28,1
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	88,8
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	3,2

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 203	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

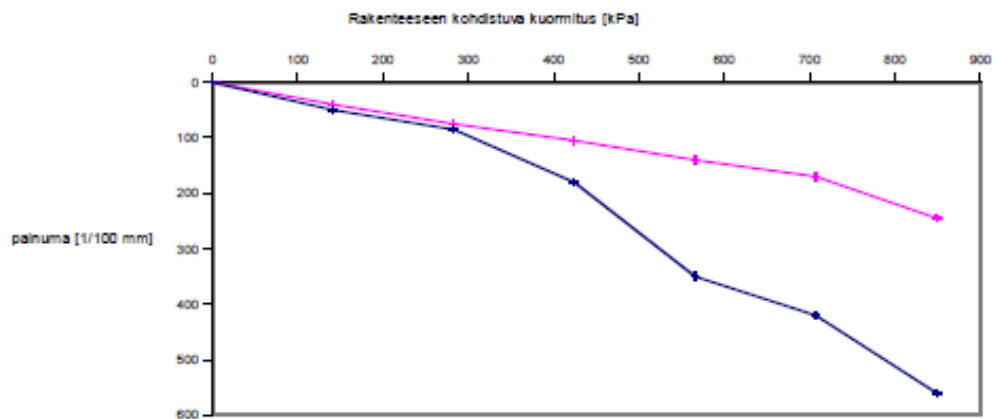
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Äurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	50	10	141	40
20	283	85	20	283	75
30	424	180	30	424	105
40	566	350	40	566	140
50	707	420	50	707	170
60	849	580	60	849	245



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	34,1
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	78,0
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,3

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 218	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

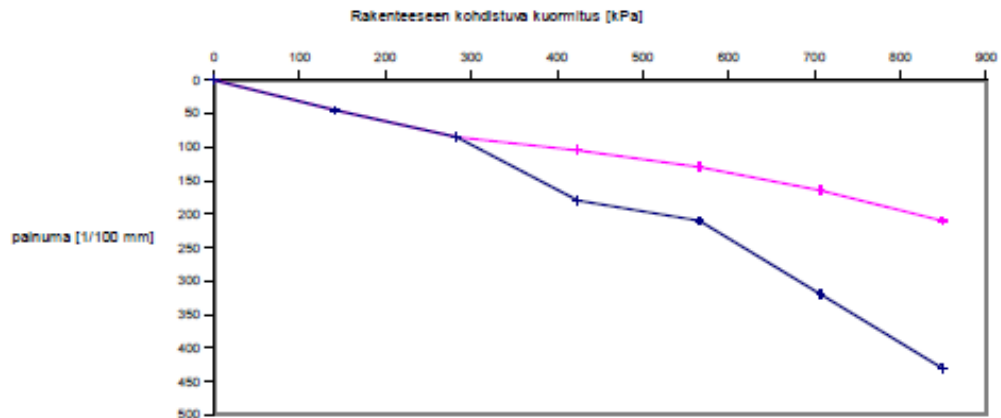
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	45	10	141	45
20	283	85	20	283	85
30	424	180	30	424	105
40	566	210	40	566	130
50	707	320	50	707	165
60	849	430	60	849	210



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	44,4
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	90,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,0

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 220	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

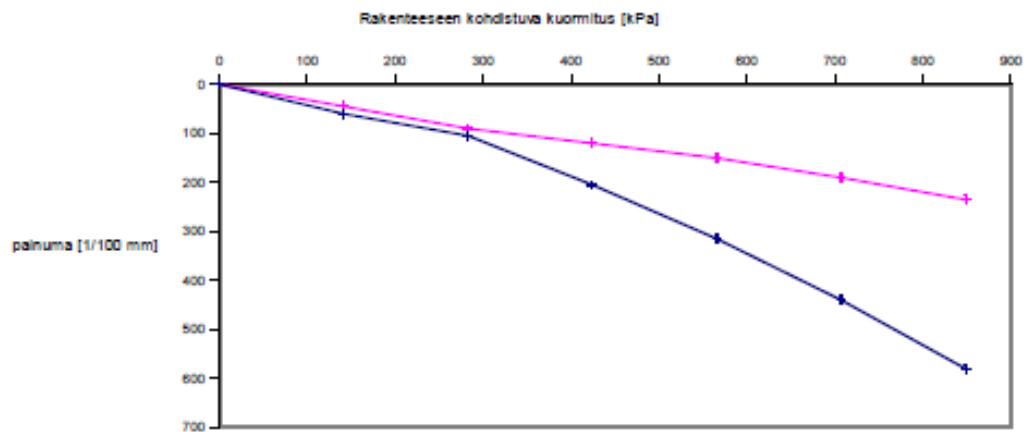
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	60	10	141	45
20	283	105	20	283	90
30	424	205	30	424	120
40	566	315	40	566	150
50	707	440	50	707	190
60	849	580	60	849	235



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

$$D = \text{levyn halkaisija [mm]}$$

$$\delta = \text{jännitys [MPa]}$$

$$\Delta s = \text{painuma [mm]}$$

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		$E_1 [\text{Mpa/m}^2]$	32,9
$E_2 \geq$		$E_2 [\text{Mpa/m}^2]$	81,3
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,5

22.08.18

Tilaaja	DESTIA
rakennuskohde	Kromitie pyörätie
tiivistyskohde	MURSKE
piste nro / paalu	PL 222
	taso

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

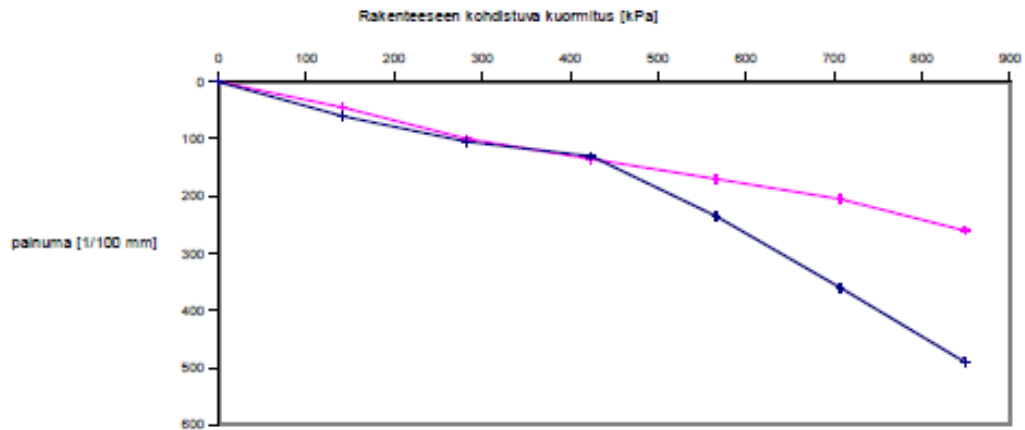
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	60	10	141	45
20	283	105	20	283	100
30	424	130	30	424	135
40	566	235	40	566	170
50	707	360	50	707	205
60	849	490	60	849	260



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	39,0
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	73,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	1,9

22.08.18

Tilaaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 224	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

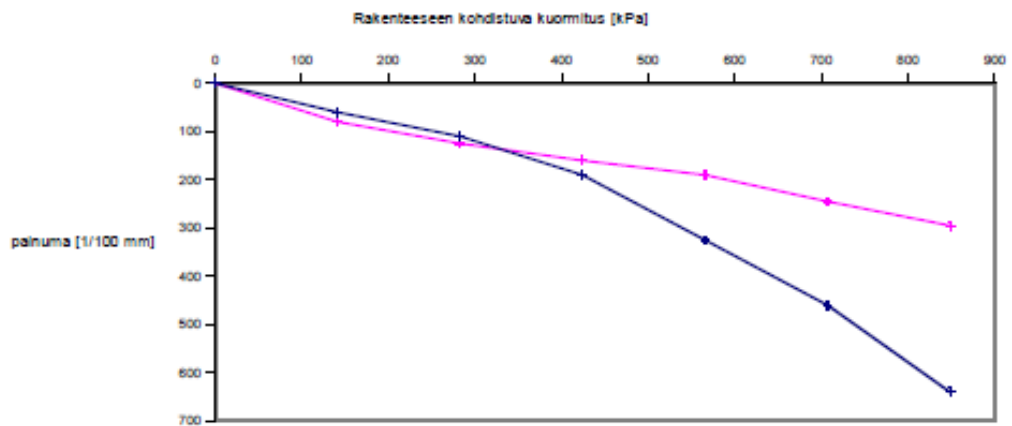
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	60	10	141	80
20	283	110	20	283	125
30	424	190	30	424	160
40	566	325	40	566	190
50	707	460	50	707	245
60	849	640	60	849	295



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	29,8
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	64,7
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,2

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 226	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

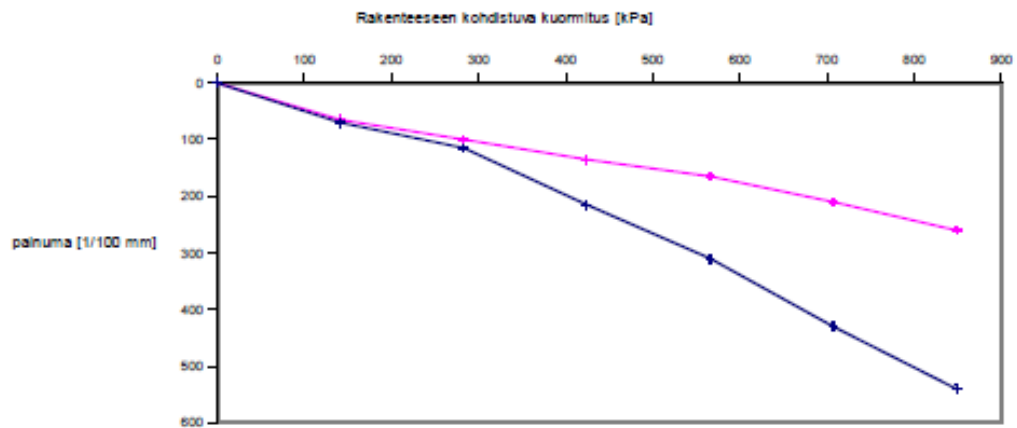
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	70	10	141	65
20	283	115	20	283	100
30	424	215	30	424	135
40	566	310	40	566	165
50	707	430	50	707	210
60	849	540	60	849	260



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	35,4
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	73,5
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,1

22.08.18

Tilaaja	DESTIA		
rakennuskohde	Kromitie pyörätie		
tiivistyskohde	MURSKE		
piste nro / paalu	PL 228	taso	

Tiivistettävä rakenne

materiaali	kerrospaksuus	lisätietoja
Kam	140	

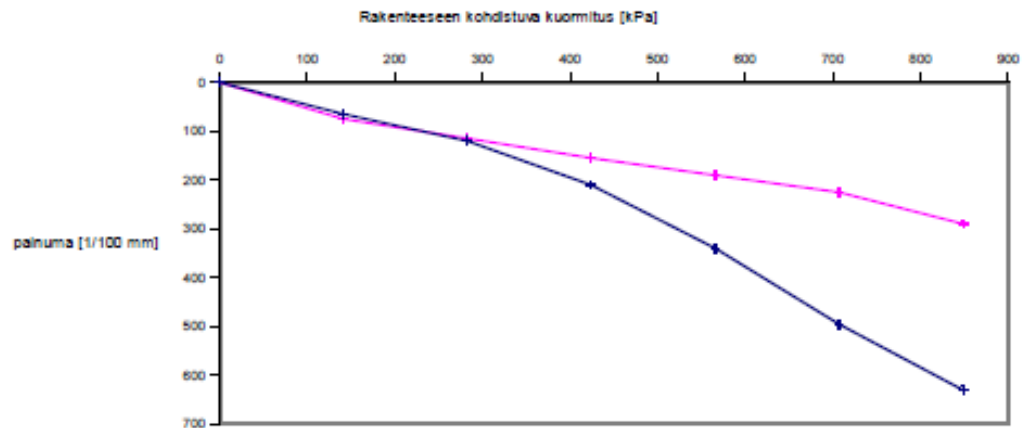
Tiivistystyön suoritus

tiivistyskone		sää	Aurinkoinen
ylityskertojen lukumäärä		lämpötila	15
lisätietoja			

Kokeen suoritus

koepäivämäärä		kokeen suorittaja	Eyl
levyn halkaisija [mm]	300	max.kuorma 40 vai 60 kN	60

1. kuormitus			2. kuormitus		
kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]	kuorma [kN]	jännitys [kPa]	painuma [mm/100]
0	0	0	0	0	0
10	141	65	10	141	75
20	283	120	20	283	115
30	424	210	30	424	155
40	566	340	40	566	190
50	707	495	50	707	225
60	849	630	60	849	280



$$E = (0,75 \cdot D \cdot \delta) / \Delta s$$

D = levyn halkaisija [mm]

δ = jännitys [MPa]

Δs = painuma [mm]

Vaadittu kantavuus		Tulokset	
		E_1 [Mpa/m ²]	30,3
$E_2 \geq$		E_2 [Mpa/m ²]	65,9
$E_2/E_1 \leq$		E_2/E_1	2,2

LIITE I: KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLTÄ TEHTYJEN PUDOTUSPAINOLAITEMITTAUSTEN TULOKSET



PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Tiivistämistarkkailu
Pudotuspainolaite (Kuab-50)

Tilaaaja Destia Oy / Laura Raerinne
Työmaa Kromitie KLV, Tornio
Koepäivä 21.08.2018
Tiivistettävä kerros Kantava kerros

nro	paikka	E_1 [MN/m ²]	E_2 [MN/m ²]	E_2/E_1
1	PL 2 (Hk)	50	97	1,9
2	PL 4 (Hk)	56	110	2,0
3	PL 6 (Hk)	65	101	1,6
4	PL 8 (Hk)	67	109	1,6
5	PL 10 (Hk)	57	108	1,9
6	PL 12 (Hk)	50	94	1,9
7	PL 23 (OKTO)	49	96	2,0
8	PL 25 (OKTO)	54	96	1,8
9	PL 27 (OKTO)	46	88	1,9
10	PL 29 (OKTO)	43	83	1,9
11	PL 31 (OKTO)	36	70	1,9
12	PL 33 (OKTO)	32	63	2,0
13				
14				
15				
16				
17				

vaatimukset

$E_1 \geq$
 $E_2 \geq$

MN/m²
MN/m²

$E_2/E_1 \leq$

kuormituslevyn halkaisija



300 mm



450 mm

Huom.

Oulu 2.9.2018

Samuli Jakkula



PANK-hyväksytty testausorganisaatio

Tiivistämistarkkailu
Pudotuspainolaite (Kuab-50)

Tilaaaja Destia Oy / Laura Raerinne
 Työmaa Kromitie KLV, Tornio
 Koepäivä 21.08.2018
 Tiivistettävä kerros Kantava kerros

nro	paikka	E_1 [MN/m ²]	E_2 [MN/m ²]	E_2/E_1
1	PL 193 (OKTO)	33	85	2,6
2	PL 195 (OKTO)	24	73	3,0
3	PL 197 (OKTO)	40	98	2,5
4	PL 199 (OKTO)	42	107	2,5
5	PL 201 (OKTO)	42	96	2,3
6	PL 203 (OKTO)	45	95	2,1
7	PL 218 (Hk)	45	105	2,3
8	PL 220 (Hk)	41	90	2,2
9	PL 222 (Hk)	46	94	2,0
10	PL 224 (Hk)	42	91	2,2
11	PL 226 (Hk)	38	85	2,2
12	PL 228 (Hk)	33	76	2,3
13				
14				
15				
16				
17				

vaatimukset

 $E_1 \geq$ MN/m² $E_2/E_1 \leq$ $E_2 \geq$ MN/m²

kuormituslevyn halkaisija



300 mm



450 mm

Huom.

Oulu 2.9.2018

Samuli Jakkula

Alla on esitetty pudotuspainolaitemittausten mittausdata. Taipumat on alla normalisoitu kuormituksen suhteen julkaisun Spoof & Petäjä (2000b) mukaisesti ja kgF:n sijasta on käytetty yksikkönä kN:a moduulien laskemiseksi. E-moduulit oli jo alkuperäisessä tutkimustulostiedostossa laskettu huomioiden kuormituksen vaihtelu, mutta taipumat normalisoitiin tavoitekuormituksen 50 kN:n suhteen.

Date Created:	21.8.2018														
Version:	2.4.75														
Load Mode:	1	(2 + 2		buffers)											
RAIR:	r = 15 cm														
Drop Height :	8	2			3			4			kg				
Impact Load :	1400	3300			4000			5100							
Sensor Number:	0	1			2			3			4			5	
Sensor Distance:	D	D.D			D			45.D			60.D			80.D	
Sensor Position:	CENTER	BEHIND			BEHIND			BEHIND			BEHIND			BEHIND	
															cm

Paikitus [m]	Imp [ms]	Load [kg]	Load [kg]	sd [kPa]	D0 [mm]	D0_norm [mm]	D1 [mm]	D1_norm [mm]	D2 [mm]	D2_norm [mm]	D3 [mm]	D3_norm [mm]	D4 [mm]	D4_norm [mm]	D5 [mm]	D5_norm [mm]	D6 [mm]	D6_norm [mm]	Air [°C]	Power [°C]	Ensat [Mpa]
2	2	458	45.6	688	3606	3786	1093	1760	775	797	358	368	174	179	353	357	169	353	13	17	50
2	3	4847	47.5	672	3829	1973	1097	1059	514	561	382	318	227	239	195	205	170	179	13	17	97
4	2	4568	44.8	684	2700	3313	1518	1093	926	1093	266	296	212	217	144	163	166	163	13	17	56
6	3	4977	48.1	684	1641	1697	788	919	658	577	274	283	208	215	182	188	168	174	13	17	110
6	2	5083	49.8	705	2851	2858	1526	1530	827	829	259	260	152	152	135	135	155	155	13	17	65
6	3	4773	46.8	662	1722	1839	882	962	547	584	266	284	201	215	171	183	160	171	13	17	101
8	2	4781	46.5	658	2680	2737	1453	1552	790	849	367	394	225	242	158	176	168	159	14	17	67
8	3	4897	48.0	679	1634	1700	950	989	561	573	311	324	226	235	187	195	170	177	14	17	109
10	2	4681	45.9	649	3008	3275	1617	1760	824	897	310	337	91	99	113	123	139	151	14	17	57
10	3	5263	51.6	730	1787	1730	992	961	566	538	298	279	189	183	171	166	164	159	14	17	108
12	2	4653	45.7	647	3022	3140	1666	1821	869	950	235	257	126	138	181	213	136	149	14	17	59
12	3	4308	48.1	681	1910	1983	977	1014	561	582	252	262	178	185	161	169	161	167	14	17	94

Paikitus [m]	Imp [ms]	Load [kg]	Load [kg]	sd [kPa]	D0 [mm]	D0_norm [mm]	D1 [mm]	D1_norm [mm]	D2 [mm]	D2_norm [mm]	D3 [mm]	D3_norm [mm]	D4 [mm]	D4_norm [mm]	D5 [mm]	D5_norm [mm]	D6 [mm]	D6_norm [mm]	Air [°C]	Power [°C]	Ensat [Mpa]
21	2	4625	45.5	643	3473	3818	1799	1378	677	644	53	58	91	100	126	139	169	164	14	17	49
21	3	4886	47.9	678	3861	1941	1088	1093	546	569	270	282	218	227	194	202	179	187	14	17	96
25	2	4657	45.7	646	3132	3427	1851	2025	6700	7332	432	473	243	266	149	163	179	196	15	17	54
25	3	4881	47.9	677	3862	1994	1137	1187	674	704	336	351	240	251	192	200	204	213	15	17	96
27	2	4611	45.2	640	3552	4016	2159	2386	1198	1324	527	582	287	299	126	139	146	161	15	17	46
27	3	4821	47.3	669	2007	2121	1205	1274	722	763	306	419	250	264	201	212	186	197	15	17	88
29	2	4527	44.4	628	3813	4232	2078	2339	1247	1404	556	626	285	236	177	199	165	186	15	18	43
29	3	4783	46.9	664	2103	2241	1157	1233	710	820	410	437	300	320	217	253	203	216	15	18	81
31	2	4535	44.5	629	4501	5125	2708	3083	1377	1547	549	617	258	290	220	247	185	208	15	18	36
31	3	4757	46.7	660	2473	2649	1501	1608	846	906	441	472	308	330	266	284	224	240	15	18	70
31	2	4480	43.1	610	5075	5878	2908	3368	1505	1743	709	8216	229	266	198	229	190	228	15	18	32
31	3	4719	46.3	655	2727	2945	1594	1723	910	1004	495	535	344	371	278	300	235	254	15	18	63

Paikutus [m]	Imp [ms]	Load [kg]	Load [kg]	sd [kPa]	D0_norm [mm]	D1_norm [mm]	D2_norm [mm]	D3_norm [mm]	D4_norm [mm]	D5_norm [mm]	D6_norm [mm]	Air [°C]	Power [°C]	Ensat [Mpa]
191	2	4599.0	45.1	638	5044	5589	2450	2715	641	710	12	13	-3	2
191	3	4599.0	48.0	680	2114	2139	1083	1127	497	423	84	67	-7	180
195	2	3957	38.8	549	6962	7833	2654	3418	798	1028	244	314	122	157
195	3	4823	47.3	669	2407	2543	1366	1732	517	546	281	294	197	199
197	2	4596	45.1	638	4155	4607	2000	3105	831	921	367	407	262	291
197	3	4944	48.5	686	1823	1889	1455	1887	482	517	389	419	240	247
199	2	4442	43.6	616	3847	2586	2967	932	1069	459	527	248	285	154
199	3	4938	48.7	689	1695	1739	1019	1045	504	517	322	330	236	242
201	2	4389	43.0	609	3813	4427	1546	1795	762	885	359	417	300	289
201	3	4725	46.7	651	1907	1915	917	946	457	467	258	287	221	235
203	2	4464	43.8	619	3620	4133	1505	1718	743	848	392	447	261	298
203	3	4642	45.5	644	1785	1963	947	930	457	502	296	325	236	259

Paikatus [m]	Imp [ms]	Load[kg]	Load [kg]	sd [kPa]	D0 [mm]	D0_norm [mm]	D1 [mm]	D1_norm [mm]	D2 [mm]	D2_norm [mm]	D3 [mm]	D3_norm [mm]	D4 [mm]	D4_norm [mm]	D5 [mm]	D5_norm [mm]	Air [°C]	Power [°C]	Ensat[Mpa]
218	2	4576	44.9	635	3175	4148	1446	1610	691	770	310	345	162	180	136	151	131	146	15
218	3	4869	47.7	676	1694	1773	673	704	453	474	267	279	183	192	145	152	129	135	18
220	2	4515	44.3	626	4012	4528	1554	2205	713	805	317	358	103	116	115	130	121	137	41
220	3	4939	48.4	685	2015	2079	1101	1449	463	448	256	156	161	117	141	125	129	15	
222	2	4653	45.6	646	3678	4028	1685	1758	714	782	330	361	199	218	142	154	105	115	18
222	3	4898	48.0	680	1896	1973	894	930	461	469	257	267	186	196	115	120	124	129	94
224	2	4511	44.2	626	3920	4428	1580	1695	780	881	340	384	214	242	153	173	125	141	42
224	3	4812	47.4	670	1931	2017	798	842	449	474	264	278	196	209	153	161	119	126	91
226	2	4605	45.2	639	4451	4926	2169	2400	888	894	270	299	200	221	171	189	142	157	38
226	3	4953	48.6	687	2122	2161	1107	1139	531	546	274	282	203	209	163	168	137	141	85
228	2	4664	45.7	647	5136	5681	2152	2361	766	817	227	248	119	152	150	164	128	140	31
228	3	4869	47.7	676	2337	2446	1080	1130	543	568	284	297	203	212	158	165	134	140	76

LIITE J: KOLMIAKSIAALIKOKEIDEN TESTAUSSELOSTUS



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Maa- ja pohjarakenteet

TESTAUSSELOSTUS MPR/255/2018 1 (9)

Nuutti Vuorimies 040 720 3050

1-2-2019

Destia Oy
Juha Mustaniemi

Tilauksen 3.7.2018

OKTO-eristeen ja vertailuhiekan kolmiaksiaalikoeket

Näytteet

Destia Oy toimitti kaksi näytettä (OKTO-eriste ja suodatinhiekkä) kannellisissa tynnyreissä, jotka otettiin TTY:llä laboratorioissa vastaan 29.8.2018. Suodatinhiekkä vertailukokeita varten haettiin Ruduksen betonitehtaalta. Näytteet olivat seuraavat:

- OKTO-eriste, Kromtien viereinen jalankulku- ja pyörätien työmaa
- Suodatinhiekkä Kromtien viereinen jalankulku- ja pyörätien työmaa
- Suodatinhiekkä betonitehtaalta (Tampere)

TTY:lle Oulusta toimitettujen näytteiden edustavuus on tilaajan vastuulla. Koska TTY:lle toimitettu hiekkä oli rakeisuuskäyrän perusteella moduuliltaan 50 MPa, se ei soveltunut vertailuhiekkaksi. TTY kyseli Tampereen lähialueelta rakeisuuskäyrän perusteella 100 MPa suodatinhiekkaksi sopivaa hiekkää ja sellainen saatiin haettua Ruduksen betonitehtaalta, jota kutsutaan vertailuhiekkaksi. TTY:ssä näytteille tehtiin kokeet työnumerolla 255/2018 ja niiden tallentamisessa käytettiin tiedostotunnusta M255.

Näytteiden esikäsittely

Näytteitä säilytettiin huoneenlämmössä kannellisissa astioissa.

Hienoainespitoisiin OKTO-eristekokkappaleisiin lisättiin noin 8 % alle 0,25 mm, 10 % 0,25-0,5 mm ja 14,5 % 0,5-1,0 mm jakeita kuiva-aineksen kokonaismassasta alkuperäiseen materiaaliin siten, että muodostuva rakeisuuskäyrä on OKTO-eristeelle määritetyn rakeisuusalueen reunalla.

Testausmenetelmät

Syklisen kolmiaksiaalikoeket tehtiin Maa- ja pohjarakenteet yksikön kehittämällä kuormituslaitteistolla. Kolmiaksiaalikoeketssä resilient-moduulien määrittäminen toteutettiin SFS-EN 13286-7:en 2004 Method B:n mukaisesti käyttämällä low stress leveliä alhaisempia jännitystason kuormitussarjoja resilient-moduuli- ja jännitystason määrittämiseksi. Osa jännitystasojista vastaa low stress levelin kuormitustasojen. Esi-kuormituspulsseja, jossa sellipaine oli 35 kPa ja deviatorinen jännitys 70 kPa, ajettiin 3 000 – 20 000 kpl. Syklisen kuormituksen jälkeen samalle näytteelle tehtiin vallitsevassa vesipitoisuudessa mo-

Postiosoite
PL 600 33101 Tampere
Tulostettu 1.2.2019

Käyntiosoite
Korkeakoulunkatu 5 33720 Tampere

Vaihe 1

WV



niportainen staattinen avoin kolmiaksaalikoe 20, 40, 70 ja 130 kPa:n sellipaineilla, joissa kullakin sellipaineella arvioitiin murren läheneminen ja kuormitus keskeytettiin ennen murtoa paitsi 130 kPa sellipaineella koekappale kuormitettiin loppuun asti.

Staattiset kolmiaksaalikokeet tehtiin isotrooppisesti konsolidoituina avoimina kolmiaksaalikokeina TTY:n kolmiaksaalikoelaitteistoilla huoneessa RH101.

Rakeisuudet määritettiin standardin 933-1:2013 mukaisesti pesu tai -kuivaseulontana.

Syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset

Koekappaleiden halkaisijat olivat 200 mm ja korkeudet noin 400 mm kokeiden alussa. OKTO-eristeiden koekappaleet M255_200mm_3 – M255_200mm_6 pyrittiin sullomaan tilaajan kanssa sovittuun kuivairtotehtyyn tilaajan toivomassa vesipitoisuudessa. OKTO-eristeen koekappale M255_200mm_7 tiivistettiin vakiotyömäärällä. Taulukossa 1 on esitetty koekappaleiden kuvaus, tiivistystyöhön käytetty aika, oletettu vesipitoisuus ja kuivairtotehtyys. Kyllästettävien koekappaleiden kyllästys tehtiin esikuormituksen jälkeen.

Taulukko 1. Koekappaleiden kuvaus, tiivistysaika, määritetty vesipitoisuus kokeen lopussa, w ja laskettu/arvioitu kuivairtotehtyys, ρ_d .

Koekappaleen tunnus	Kuvaus	tiivistys-aika	w , %	ρ_d , kg/m ³
M255_200mm_3	OKTO, $w \sim 5\%$	38 s	5,0	1,62
M255_200mm_4	OKTO, kyllästetty	18 s	21 ^{*)}	1,57
M255_200mm_5	OKTO, hienoainespitoisuus, $w \sim 5\%$	7 s	5,0	1,61
M255_200mm_6	OKTO, hienoainespitoisuus, kyllästetty	7 s	21 ^{*)}	1,62
M255_200mm_7	tiivis OKTO, hienoainespitoisuus, kyllästetty	32 s	32 ^{*)}	1,72
M255_200mm_8	Vertailuhiekka, kyllästetty	28 s	28 ^{*)}	1,78
M255_200mm_9	Vertailuhiekka, $w \sim 5\%$	28 s	4,7	1,78

^{*)} kokeen jälkeen. Osa vedestä poistui kokeen aikana ja koekappaletta purettaessa kaikkia vettä ei saatu talteen.

Koekappaleiden korkeudet ja halkaisija määritettiin myös koekappaleesta ennen sellin asentamista sen suojaksi. Halkaisijat olivat 201-201,5 mm, paitsi koekappaleilla M255_200mm_3 ja M255_200mm_5 ne olivat 202,3 mm ja 202,0 mm. Kokeiden jäl-

WV



keen koekappaleiden eri korkeustasoilta määritettiin vesipitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 2. Koekappaleiden vesipitoisuus määritettiin koko koekappaleesta kolmessa osassa, jolloin varmistettiin koekappaleiden kuivatilavuuspainot. Koekappaleiden keski-osasta otetusta näytteistä määritettiin rakeisuudet, jotka on esitetty OKTO-eristemateriaalin osalta liitteen 1 lopussa ja vertailuhiekkan osalta liitteen 2 lopussa.

Taulukko 2. Koekappaleista kuormituksen jälkeen eri korkeustasoilta määritetyt vesipitoisuudet sekä niiden koko näytteen vesipitoisuudet.

Koekappaleen tunnus	Yläosa w, %	Keski w, %	Alaosa w, %	Koko w, %
M255_200mm_3	4,5	5,0	4,7	4,8
M255_200mm_4 ^{k)}	8,7	24,9	24,1	20,6
M255_200mm_5	4,0	4,5	5,9	4,8
M255_200mm_6 ^{k)}	16,1	23,7	21,8	20,8
M255_200mm_7 ^{k)}	15,6	25,0	24,2	22,4
M255_200mm_8 ^{k)}	9,2	15,5	25,7	17,0
M255_200mm_9	4,0	4,5	5,6	4,7

^{k)} Kyllästetty näyte, vettä poistui koekappaletta purettaessa ja kokeen aikana

Resilient-moduulimäärittysten tulokset OKTO-eristeelle on esitetty liitteessä 1 ja vertailuhiekalle liitteessä 2. Koekappaleiden muodonmuutokset stabiloituivat esikuormituksessa. Taulukossa 3 on esitetty esikuormitus syklien määrät ja koekappaleiden kokoonpuristumat esikuormitusten aikana. Erittäin pienellä tiivistysajalla tehdyt koekappaleet M255_200mm_5 ja M255_200mm_6 tiivistyivät selkeästi eniten esikuormituksessa.

Taulukko 3. Koekappaleiden esikuormitus syklien määrät ja a noin 400 mm korkeiden koekappaleiden kokoonpuristumat esikuormitusten aikana.

Koekappaleen tunnus	Esikuormitus sykliä kpl	Kokoonpuristuma mm
M255_200mm_3	3 100	0,9
M255_200mm_4	3 000	0,9
M255_200mm_5	5 100	3,6
M255_200mm_6	20 000	2,7
M255_200mm_7	9 000	0,5
M255_200mm_8	9 500	1,1
M255_200mm_9	9 400	0,8

uv



Taulukossa 4 on esitetty koekappaleiden laskennallisesti arvioidut kuivairtotehdet kuormituksen alkaessa ja kokeista määritettyjen resilient-moduulien perusteella sovitettua k_1 ja k_2 arvot yhtälöön (1), jossa M_r on resilient-moduuli (kPa), θ on pääjännitysten summa (kPa), θ_0 on vertailuluku (100 kPa), k_1 on materiaaliparametri (moduuliluku) ja k_2 on materiaaliparametri (jännityksen eksponentti). Ensimmäistä eli 15 kPa:n sellipaineen pienimmällä kuormituspulssilla mitattua resilient-moduulia ei käytetty k_1 ja k_2 arvojen määrittämisessä. Hyvin tiivistetystä hienoainespitoisesta kyllästetystä OKTO-eristeen koekappaleesta M255_200mm_7 määritettyihin Mr-moduuleihin tulee suhtautua varovaisuudella, koska eri sisäpuolisten siirtymäantureiden perusteella määritetyt Mr-moduulit erosivat toisistaan huomattavasti. Koekappaleen M255_200mm_7 Mr-moduulien määrittämisestä poistettiin pienimpiä moduuleja antaneen anturin arvot, koska anturin mittaama pysyvä siirtymä ei antanut luotettavia arvoja. Tällöin ensimmäisessä määrittämisessä poistettiin myös kyseistä anturia vastapäätä toisella puolella koekappaletta olleen anturin mittaustulokset. Koska ensimmäisessä määrittämisessä käytetyistä antureista toinen antoi pienillä jännityksillä selkeästi pienempiä muodonmuutoksia kuin muut anturit, oli syytä epäillä, että anturin kiinnityspisteet eivät olleet hyvässä kontaktissa koekappaleen kanssa, jonka vuoksi toisessa määrittämisessä koekappaleesta M255_200mm_7 hyödynnettiin vain kahden luotettavimmin toimineen sisäpuolisen pystysiirtymäanturin mittaustuloksia.

$$M_r = k_1 \theta_0 (\theta / \theta_0)^{k_2} \quad (1)$$

Taulukko 4. Koekappaleiden laskennallisesti arvioidut kuivairtotehdet kuormituksen alkaessa, ρ_d , ja koekappaleista määritetyt k_1 ja k_2 parametrit. Lisäksi k_1 ja k_2 parametreilla määritetyt resilient-moduulit on esitetty pääjännityksen summan (θ) ollessa 100 kPa.

Koekappaleen tunnus	ρ_d , kg/m ³	k_1	k_2	M_r , MPa ($\theta = 100$ kPa)
M255_200mm_3	1,62	1497	0,553	150
M255_200mm_4	1,57	1182	0,491	118
M255_200mm_5	1,61	1399	0,386	140
M255_200mm_6	1,62	947	0,544	95
M255_200mm_7 ^{*)}	1,72	2035	0,382	204
M255_200mm_7 ^{**)}	1,72	1730	0,431	173
M255_200mm_8	1,78	1168	0,412	117
M255_200mm_9	1,78	1442	0,534	144

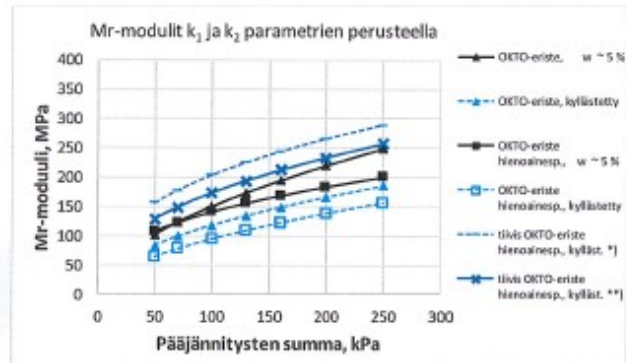
^{*)} kahdesta vastakkaisesta anturista

^{**)} kahdesta luotettavimmalla tavalla käyttäytyneestä anturista

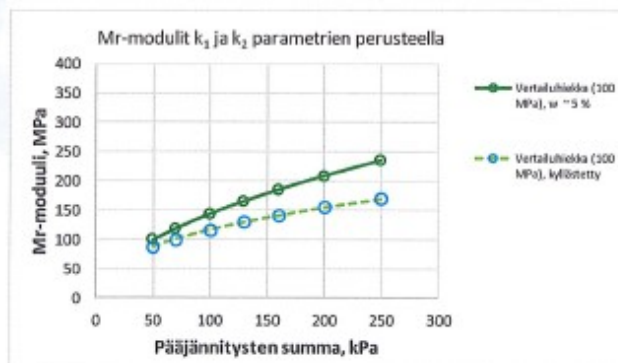
WV



Kuvassa 1 on esitetty OKTO-eristeestä tehtyjen koekappaleiden k_1 ja k_2 parametreista lasketut M_r -moduulit ja kuvassa 2 on vastaavasti vertailuhiekan (100 MPa) koekappaleiden k_1 ja k_2 parametreista lasketut M_r -moduulit. Kuvassa 3 on vastaavasti molempien materiaalien M_r -moduulit.

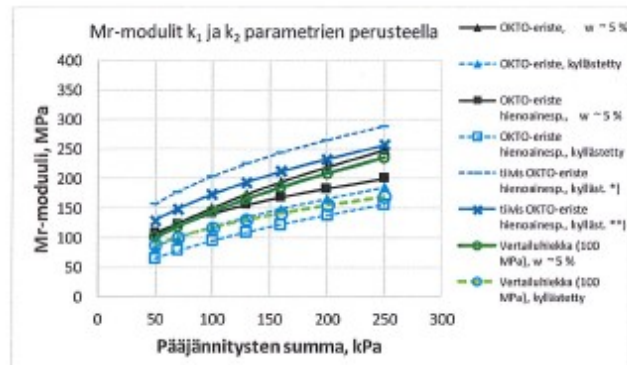


Kuva 1. OKTO-eristeestä tehtyjen koekappaleiden M_r -moduulit määritetyistä k_1 ja k_2 arvoista laskettuna. Selitykset: *) kahdesta vastakkaisesta anturista, **) kahdesta luotettavimmalla tavalla käytettyneestä anturista.



Kuva 2. Vertailuhiekasta (100 MPa) tehtyjen koekappaleiden M_r -moduulit määritetyistä k_1 ja k_2 arvoista laskettuna.

Handwritten signature



Kuva 3. OKTO-eristeestä ja vertailuhiekasta (100 MPa) tehtyjen koekappaleiden M_r -moduulit määritetyistä k_1 ja k_2 arvoista laskettuna. Selitykset: *) kahdesta vastakkaisesta anturista, **) kahdesta luotettavimmalla tavalla käytettyneestä anturista.

OKTO-eristemateriaalista tehtyjen koekappaleiden moniportaisten staattisten kolmiaksaalikoe tulokset on esitetty liitteessä 1 ja vertailuhiekan liitteessä 2.

Moniportaisten staattisten kolmiaksaalikoeuormitusten perusteella koekappaleista määritetyt kitkakulmat ja koheesiot on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Koekappaleista moniportaisella staattisella kolmiaksaalikokeella määritetyt kitkakulmat, ϕ ja koheesiot, c sekä leikkauslujuus, τ , kun σ on 70 kPa.

Koekappaleen tunnus	ϕ	c , kPa	τ , kPa ($\sigma = 70$ kPa)
M255 200mm 3	40,8°	31,3	92
M255 200mm 4 ^{k)}	37,8°	20,6	75
M255 200mm 5	37,2°	22,5	76
M255 200mm 6 ^{k)}	38,5°	14,3	70
M255 200mm 7 ^{k)}	39,3°	24,4	82
M255 200mm 8 ^{k)}	39,5°	15,7	73
M255 200mm 9	42,0°	23,9	87

^{k)} Kyllästetty koekappale

WV



Avoimien kolmiak-siaalikoekiden tulokset

OKTO-eristeen koesarjan koekappaleet pyrittiin tiivistämään tavoitekuivairtoihyteen noin 6 % vesipitoisuudessa.

Liitteessä 3 on esitetty OKTO-eristeelle tehtyjen avoimien kolmiak-siaalikoekiden tulokset. Koekappaleet rakennettiin noin 6 % vesipitoisuudessa tavoitekuivatilavuuspainon olleessa 15,8 kN/m³. Koekappaleiden kuivatilavuuspainot olivat 16,4 – 16,6 kN/m³. Taulukossa 6 on esitetty koekappaleista määritetyt B-arvot 10 minuutin kohdalla ja määrittelyn loppuessa. Koekappaleesta M255_A3 määrittelyä ei tehty. Kokeissa takapaine oli 0 kPa. Suurimmat leikkausjännitykset koekappaleissa on saavutettu 1,9 – 2,2 % aksiaalilla muodonmuutoksilla.

Taulukko 6. OKTO-eristeen kolmiak-siaalikoesarjan koekappaleista määritetyt B-arvot 10 minuutin kohdalla ja B-arvon määrittelyn loppuessa sekä sellipaine määrittelyn alussa ja sellipaineen muutos.

Koekappale	M255_A1	M255_A2	M255_A3
Sellipaine alussa	19 kPa	36 kPa	51 kPa
Δsellipaine	10 kPa	13,5 kPa	10 kPa
B-arvo _{10min}	0,15	0,06	0,10
B-arvon määrittelyn kesto	12 min	11 min	11 min
B-arvo lopussa	0,15	0,07	0,09

Liitteessä 4 on esitetty Vertailuhiekalle (100 MPa) tehtyjen avoimien kolmiak-siaalikoekiden tulokset. Koekappaleet rakennettiin noin 6 % vesipitoisuudessa tavoitekuivatilavuuspainon olleessa 16,5 kN/m³. Koekappaleiden kuivatilavuuspainot olivat 16,7 – 16,8 kN/m³. Kokeessa M255_A6A (sellipaine 200 kPa) koekappaleeseen saattoi hieman suodattua vettä, jonka vuoksi aksiaalisen muodonmuutoksen kasvaessa koetuloksen leikkausjännitys saatetaan mitata hieman liian suurena liian pieneksi lasketun pinta-alan vuoksi. Taulukossa 7 on esitetty koekappaleista määritetyt B-arvot 10 minuutin kohdalla ja määrittelyn loppuessa. Kokeissa takapaine oli 0 kPa. Kokeessa M255_A6A (sellipaine 200 kPa) koekappaleeseen saattoi hieman suodattua vettä, jonka vuoksi aksiaalisen muodonmuutoksen kasvaessa koetuloksen leikkausjännitys saatetaan mitata hieman liian suurena liian pieneksi lasketun pinta-alan vuoksi. Suurimmat leikkausjännitykset koekappaleissa on saavutettu 1,7 – 3,1 % aksiaalilla muodonmuutoksilla.

WV



Taulukko 7. Vertailuhiekan kolmiaksaalikoesarjan koekappaleista määritetyt B-arvot 10 minuutin kohdalla ja B-arvon määrittämisen lopussa sekä sellipaine määrittämisen alussa ja sellipaineen muutos.

Koekappale	M255_A4	M255_A5	M255_A6A
Sellipaine alussa	24 kPa	27 kPa	25 kPa
Δsellipaine	11 kPa	10,5 kPa	11,5 kPa
B-arvo _{10min}	0,15	0,08	0,15
B-arvon määrittämisen kesto	35 min	22 min	25 min
B-arvo lopussa	0,17	0,09	0,19

Taulukossa 8 on esitetty koekappaleiden maksimileikkauslujuuksien perusteella määritetyt lujuusparametrit. Maksimileikkausjännityksistä määritettyjen lujuusparametrien lisäksi informatiiviseksi tiedoksi on määritetty jäännöslujuuden lujuusparametrit 9,8 % muodonmuutostasolta.

Taulukko 8. Kolmiaksaalikoesarjoista määritetyt tehokkaat lujuusparametrit suurimmilla leikkausjännityksillä ja koesarjan koekappaleiden kuivatilavuuspainot, γ_d , konsolidoinnin jälkeen.

Materiaali	ϕ'	c' (kPa)	γ_d (kN/m ³)
OKTO-eriste	41,4°	36,4	16,6 – 16,7
Vertailuhiekka	38,9	23,2	16,7 – 16,8

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Kokeet tehtiin 1.9. – 25.1.2019. Alustavia koetuloksia lähetettiin tilaajalle 13.11., 20.12. ja 28.12.2018. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Projektipäällikkö, DI

Nuutti Vuorimies
Nuutti Vuorimies

Professori

Pauli Kolisoja
Pauli Kolisoja

JAKELU

Asiakas
TTY

Postiosoite
PL 600 33101 Tampere
Tulostettu 1.2.2019

Käyntiosoite
Korkeakoulunkatu 5 33720 Tampere

Vaihe 1

WV



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Maa- ja pohjarakenteet

TESTAUSSELOSTUS MPR/255/2018 9 (9)

Nuutti Vuorimies 040 720 3050

1-2-2019

LIITTEET

- Liite 1. OKTO-eriste, syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset (12 sivua)
- Liite 2. Vertailuhiekka, syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset (5 sivua)
- Liite 3. OKTO-eriste, avoimen kolmiaksaalikoesarjan tulokset (9 sivua)
- Liite 4. Vertailuhiekka, avoimen kolmiaksaalikosarjan tulokset (9 sivua)

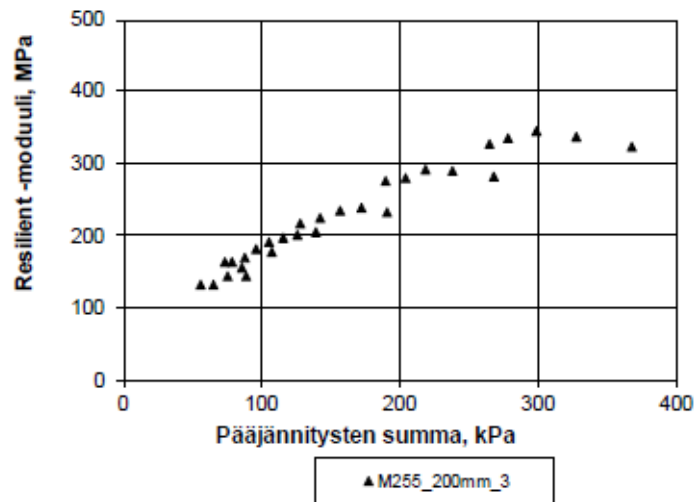
Postiosoite
PL 600 33101 Tampere
Tulostettu 1.2.2019

Käyntiosoite
Korkeakoulunkatu 5 33720 Tampere

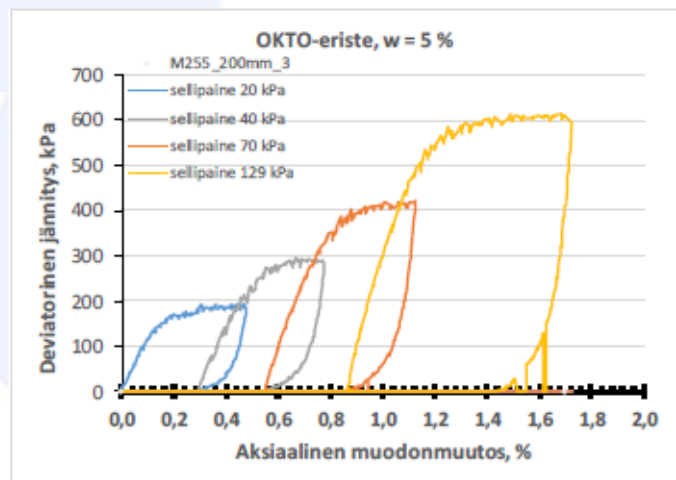
Vaihde 1



OKTO, $w = 5\%$

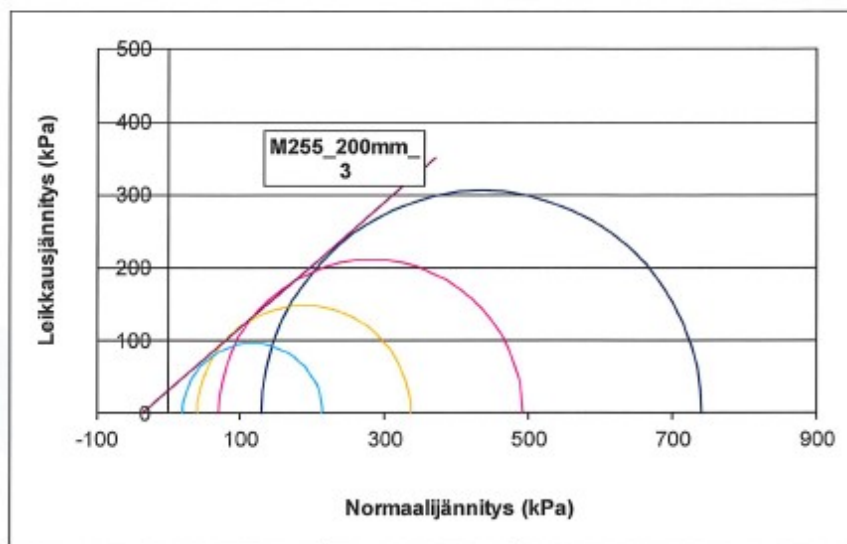


Koekappaleesta M255_200mm_3 (OKTO-eriste) määritetyt resilient-moduulit.



Moniportaisen staattisen kolmiakselikokeen M255_200mm_3 (OKTO-eriste) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

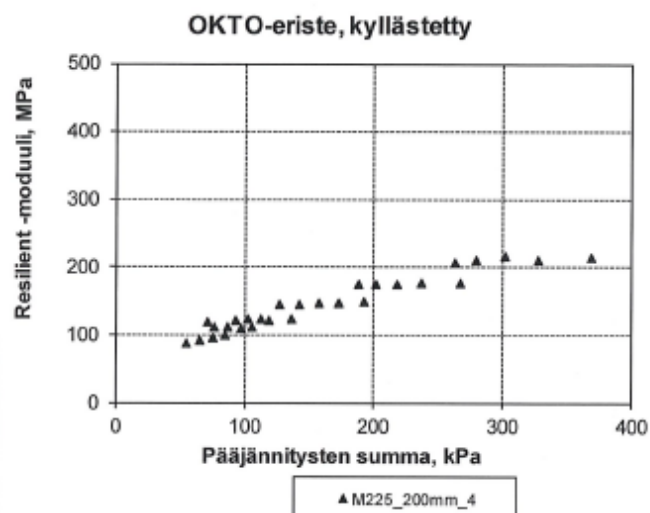
Handwritten signature



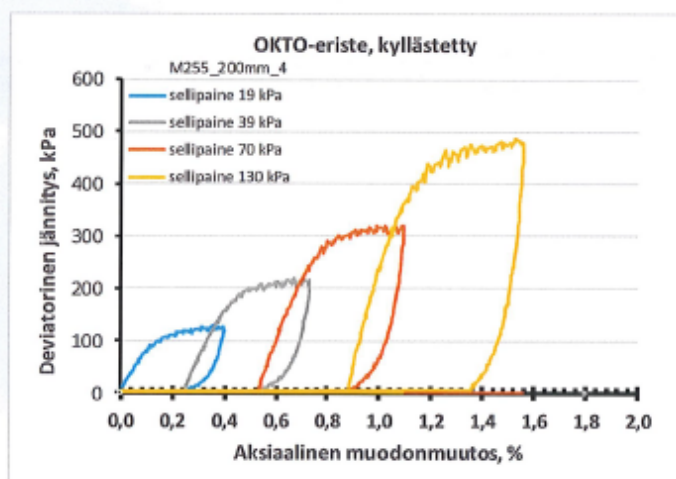
F_{ij}	$40,8^\circ$
c^*	$31,3 \text{ kPa}$

Koekappaleelle M255_200mm_3 (OKTO-eriste) moniportaisesta staattisesta kolmiakselialikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

WV

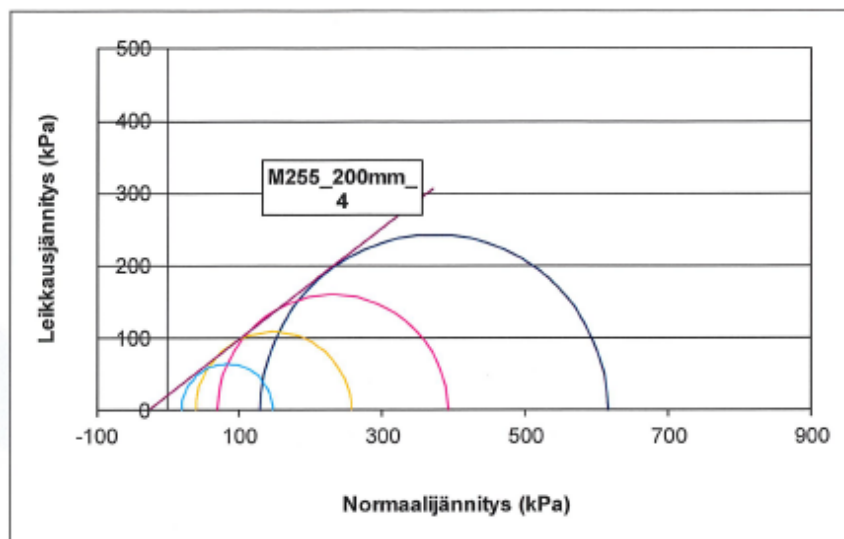


Koekappaleesta M255_200mm_4 (OKTO-eriste, kyllästetty) määritetyt resilient-moduulit.



Moniportaisen staattisen kolmiaksaalikokeen M255_200mm_4 (OKTO-eriste, kyllästetty) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

W



$F_{II} =$	37,8°
$c^* =$	20,6 kPa

Koekappaleelle M255_200mm_4 (OKTO-eriste, kyllästetty) moniportaisesta staattisesta kolmiaksisiaalikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

WV

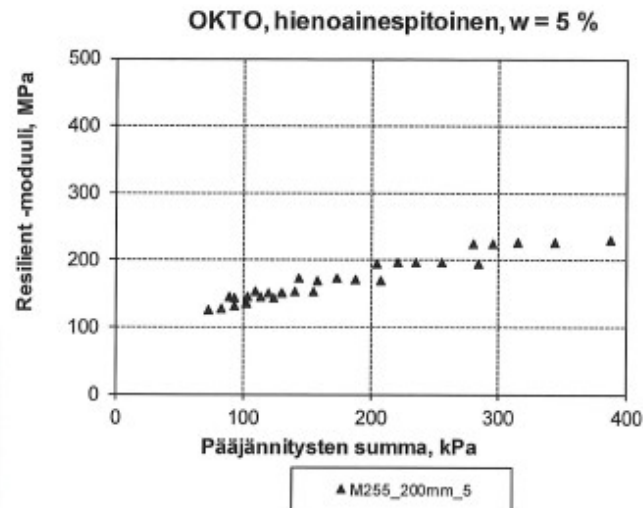


TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Maa- ja pohjarakenteet

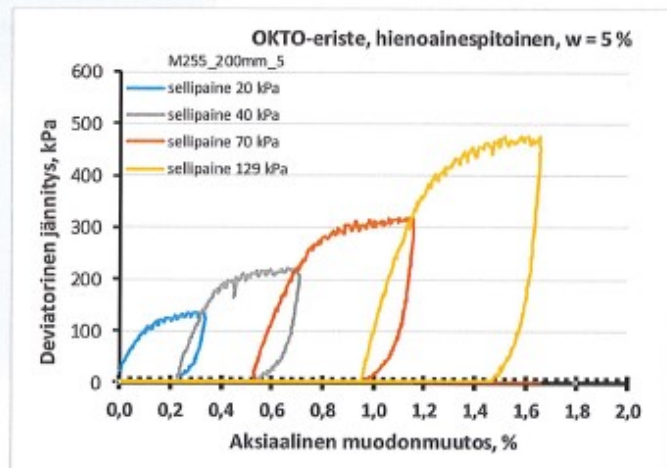
MPR/255/2018

LIITE 1.

5(12)



Kockappaleesta M255_200mm_5 (hienoainespitoinen OKTO-eriste) määritetyt resilient-moduulit.



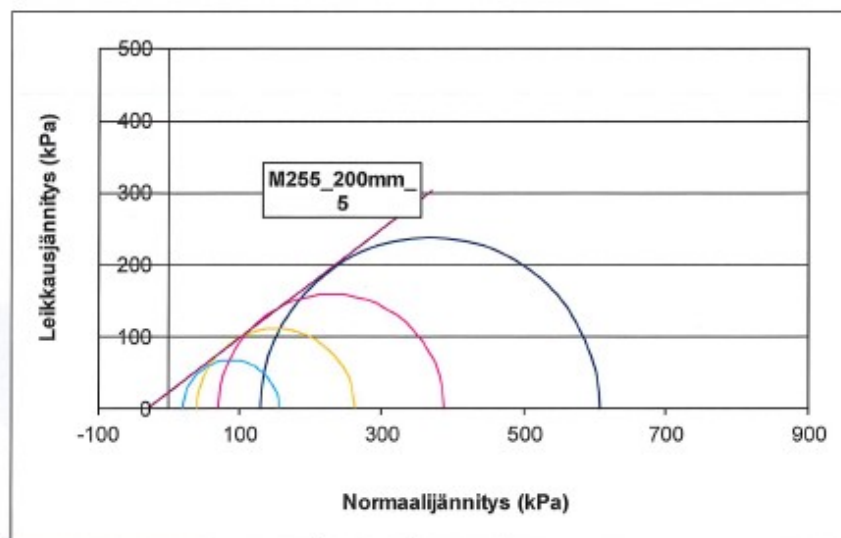
Moniportaisen staattisen M255_200mm_5 (hienoainespitoinen OKTO-eriste) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

Postiosoitte
PL 600 33101 Tampere

Käyntiosoitte
Korkeakoulunkatu 5 33720 Tampere

Valhde I
03-3115 111

mw

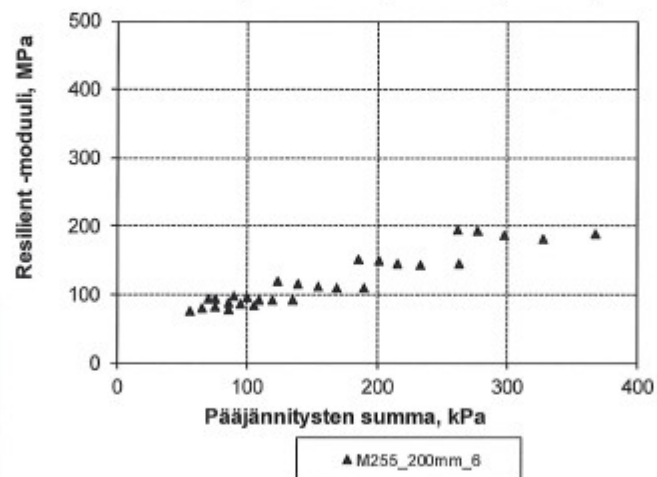


$\phi_i =$	37,2°
$c^* =$	22,5 kPa

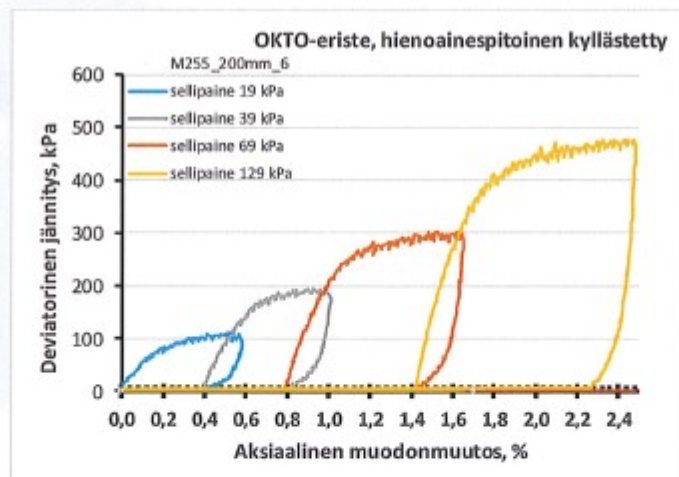
Koekappaleelle M255_200mm_5 (hienoainespitoinen OKTO-eriste) moniportaisesta staattisesta kolmiaksaalikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.



OKTO-eriste, hienoainespitoinen kyllästetty

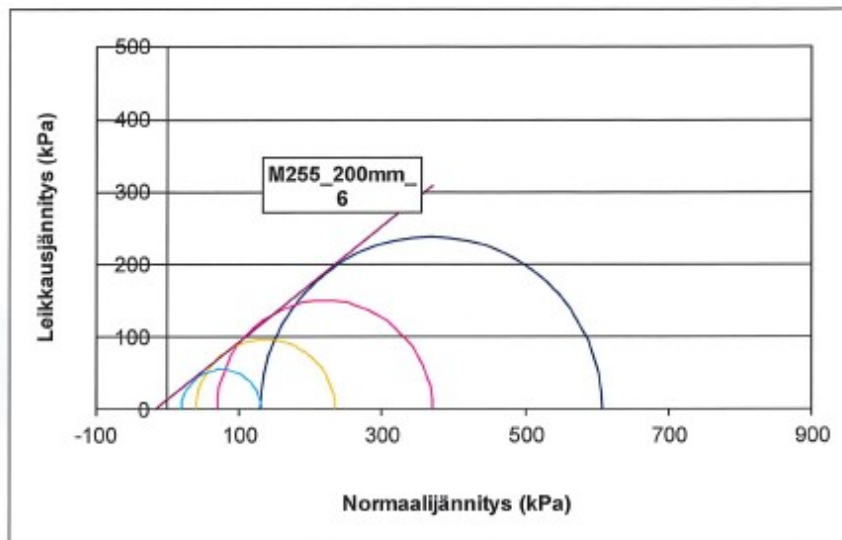


Koekappaleesta M255_200mm_6 (hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) määritetyt resilient-moduulit.



Moniportaisen staattisen kolmiaksaalikokeen M255_200mm_6 (hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista. 130 kPa:n sellipaineen kuormituksessa sellipaine kohosi vähäksi aikaa tavoitealuetta suuremmaksi ja kyseisiä jännityksiä ei ole tulostettu kuvaan.

WV



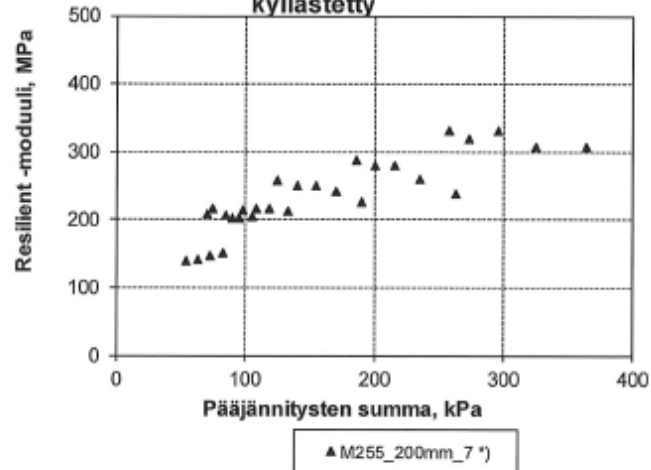
φ_{li}	38,5°
c^*	14,3 kPa

Koekappaleelle M255_200mm_6 (hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) moniportaisesta staattisesta kolmiakselikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

WV

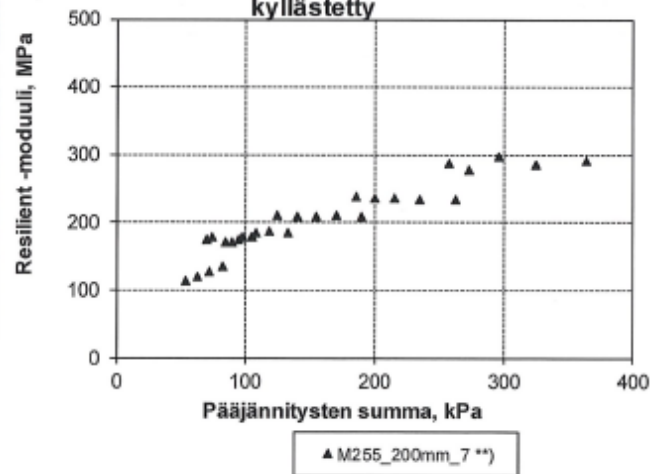


**OKTO-eriste, tiivis hienoainespitoinen
kyllästetty**



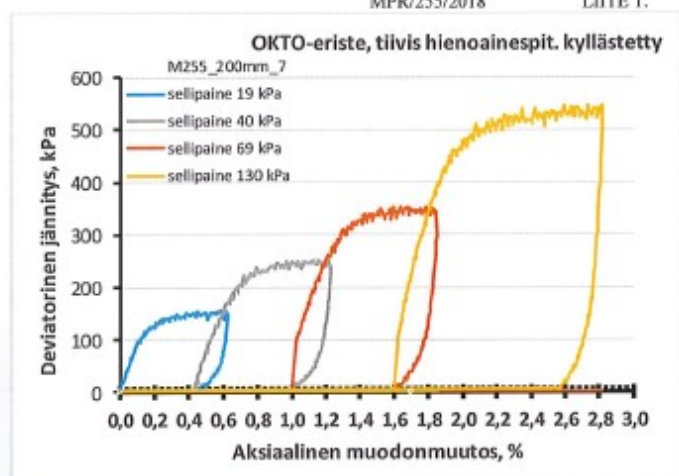
Koekappaleesta M255_200mm_7 *) (tiivis hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) määritetyt resilient-moduulit.

**OKTO-eriste, tiivis hienoainespitoinen
kyllästetty**

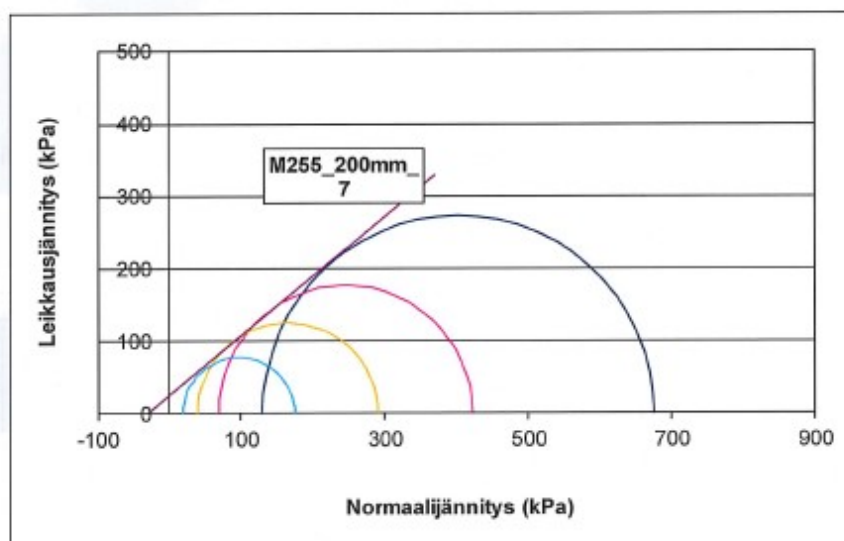


Koekappaleesta M255_200mm_7 **) (tiivis hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) määritetyt resilient-moduulit.

Handwritten signature



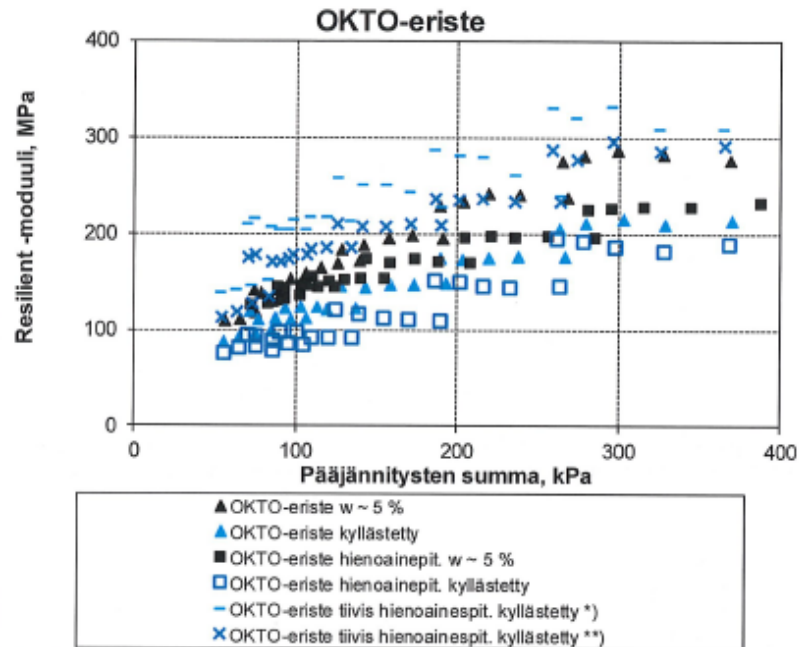
Moniportaisen staattisen kolmiaksaalikokeen M255_200mm_7 (tiivis hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista



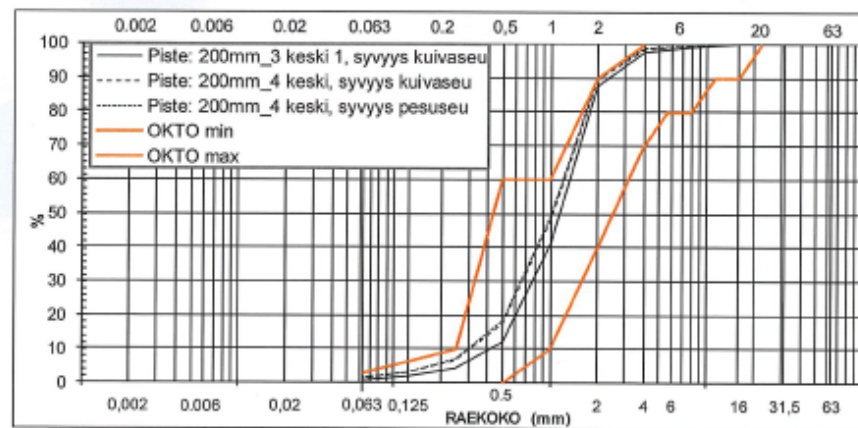
$F_{II} =$	39,3°
$c^* =$	24,4 kPa

Koekappaleelle M255_200mm_7 (tiivis hienoainespitoinen OKTO-eriste, kyllästetty) moniportaisesta staattisesta kolmiaksaalikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

W

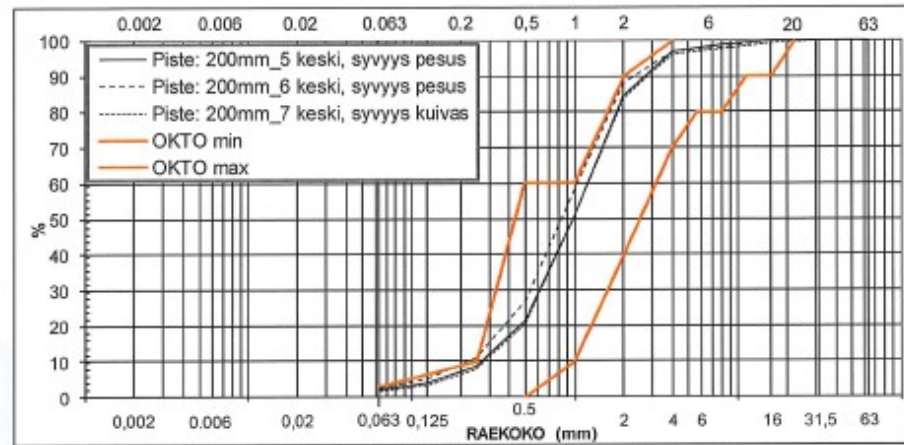


Materiaaleista OKTO-eriste ja hienoainespitoinen OKTO-eriste määritetyt resilient-moduulit.

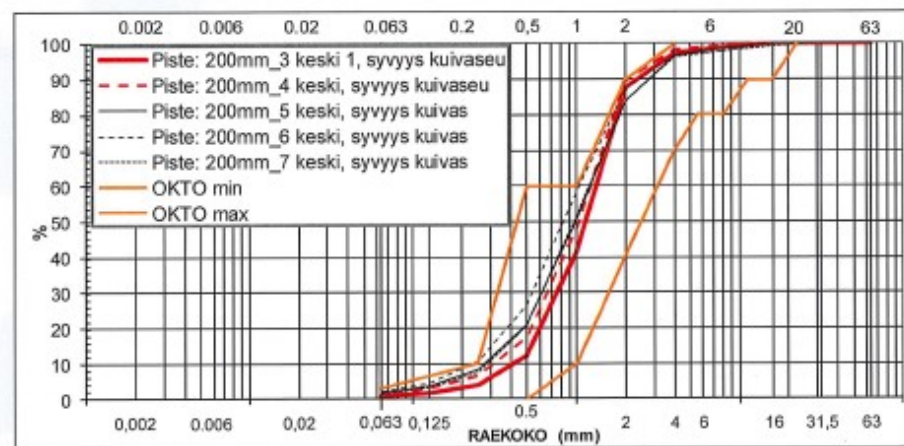


OKTO-eriste materiaalin koekappaleista M255_200mm_3 ja M255_200mm_4 määritetyt rakeisuudet

WV



OKTO-eriste materiaalin koekappaleista M255_200mm_5, M255_200mm_6 ja M255_200mm_7 määritetyt rakeisuudet

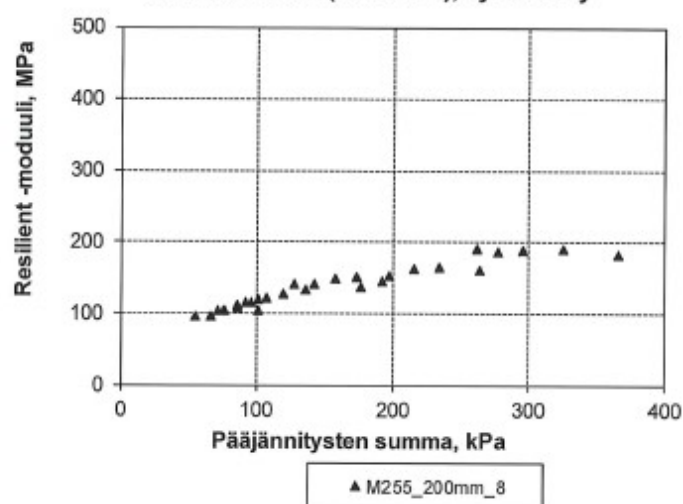


OKTO-eriste materiaalin koekappaleiden M255_200mm_3, M255_200mm_4, M255_200mm_5, M255_200mm_6 ja M255_200mm_7 keskiosasta kuivaseulonnalla määritetyt rakeisuudet. Punaisella värillä perusmateriaalin ja mustalla hienoaainesta lisätyn materiaalin rakeisuudet.

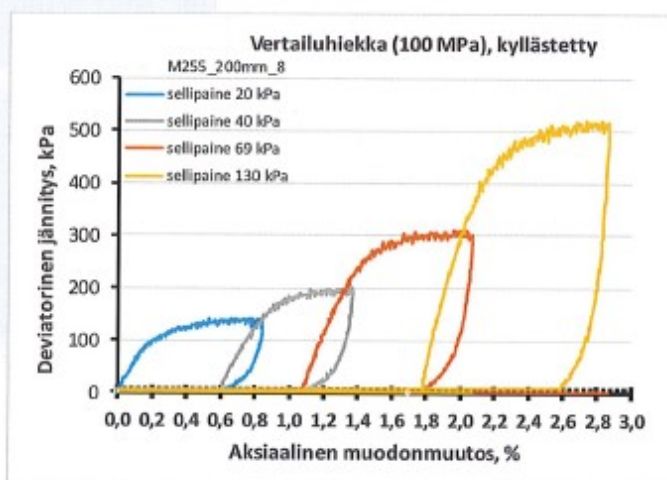
uv



Vertailuhiekka (100 MPa), kyllästetty

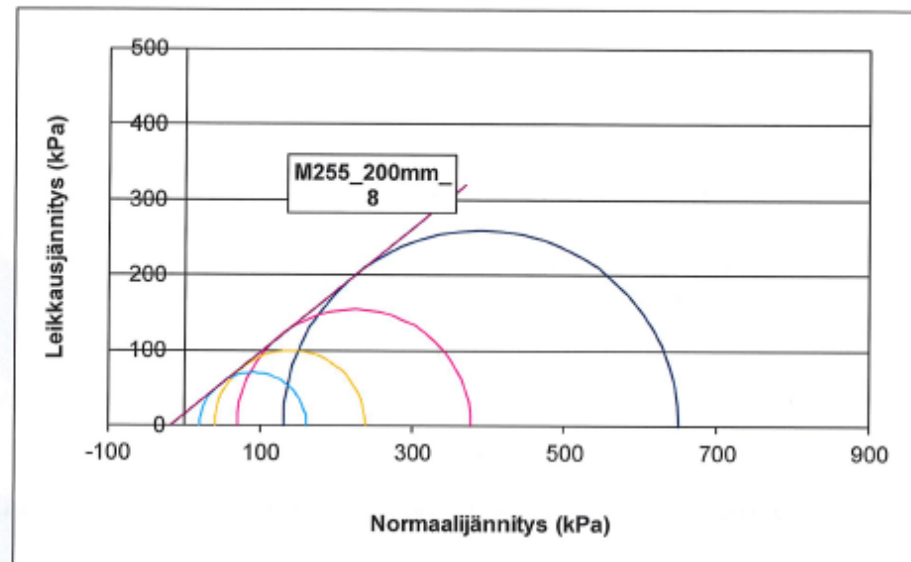


Koekappaleesta M255_200mm_8 (Vertailuhiekka (100 MPa), kyllästetty) määritetyt resilient-moduulit.



Moniportaisen staattisen kolmiaksisiaalikokeen M255_200mm_8 (Vertailuhiekka (100 MPa), kyllästetty) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

Handwritten signature



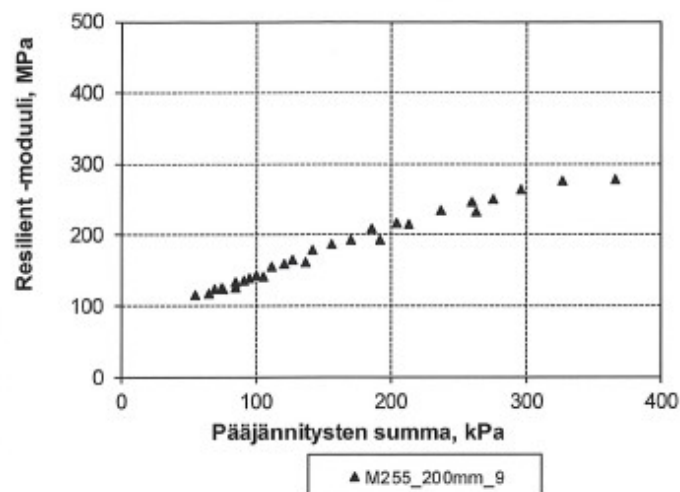
$\phi_{ii} =$	39,5°
$c^* =$	15,7 kPa

Koekappaleelle M255_200mm_8 (Vertailuhiekka (100 MPa), kyllästetty) moniportaisesta staattisesta kolmiakselialikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

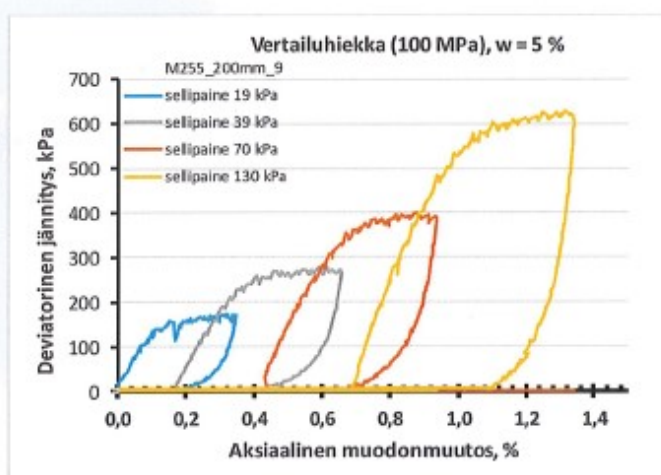
WV



Vertailuhiekka (100 MPa), w = 5 %

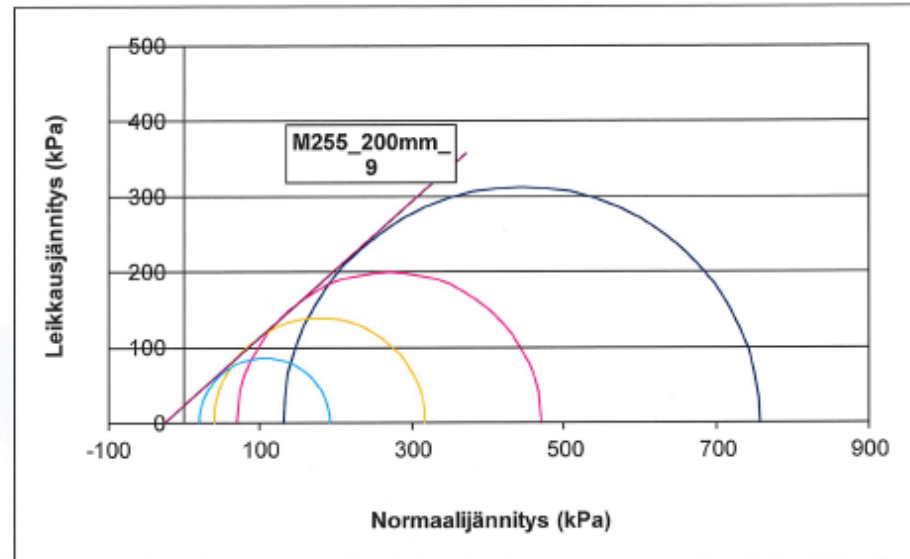


Kokkappaleesta M255_200mm_9 (Vertailuhiekka (100 MPa)) määritetyt resilient-moduulit.



Moniportaisen staattisen kolmiaksaalikokeen M255_200mm_9 (Vertailuhiekka (100 MPa)) deviatorinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

WV



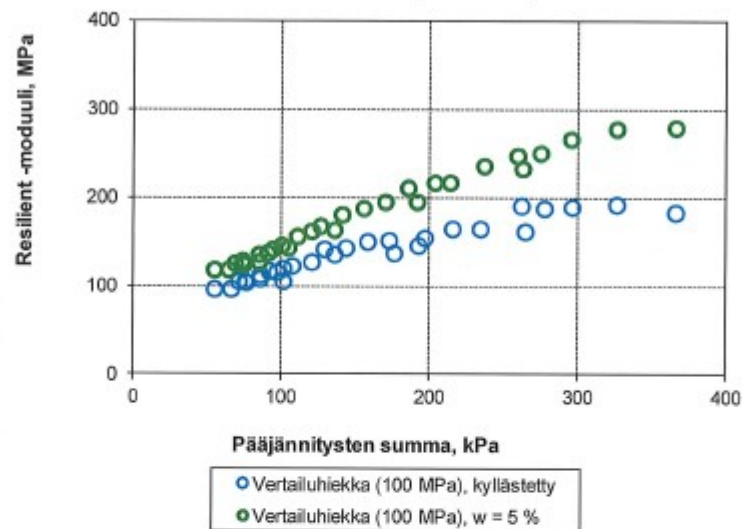
$F_{ii} =$	42,0°
$c^* =$	23,9 kPa

Koekappaleelle M255_200mm_9 (Vertailuhiekka (100 MPa)) moniportaisesta staattisesta kolmiakselialikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

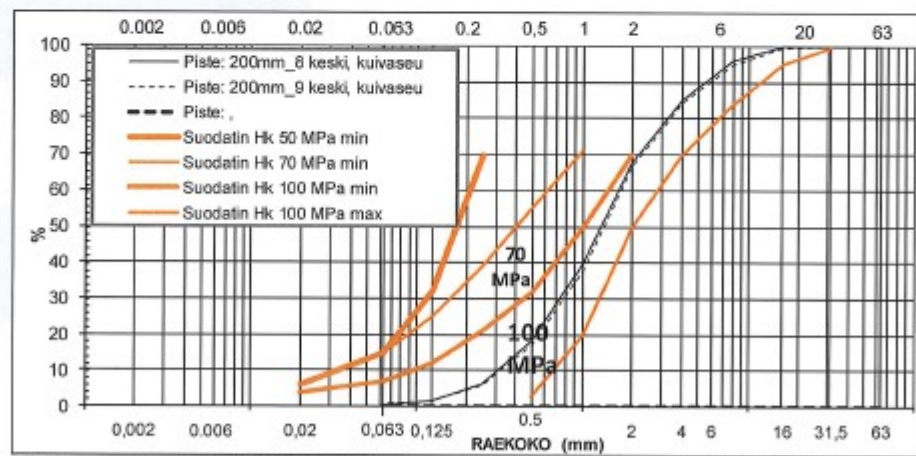
mv



Vertailuhiekka (100 MPa)



Materiaalista Vertailuhiekka (100 MPa) määritetyt resilient-moduulit.



Materiaalin Vertailuhiekka (100 MPa) koekappaleiden M255_200mm_8 ja M255_200mm_9 keskiosasta kuivaseulonnalla määritetyt rakeisuudet.

W

Testausselostus MPR/255/2018 Liite 3.1 / 9

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE				
TTY		ASIAKAS		Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet		KOHDE		OKTO-eriste
PL 600 33101 TAMPERE		TYÖNUMERO		255/2018
KOKEEN / KOESELIN N:o	10	10	10	
PISTE, PAALU				
SYVYYS [m]	-	-	-	
TIEDOSTO	M255_A1	M255_A2	M255_A3	
NOPEUS [mm/min]	0,015	0,015	0,015	
KOKEEN ALUSSA SULLOTTUNA: pvm 13.9.2018 18.9.2018 25.9.2018				
NÄYTTEEN HALKAISUJA [mm]	51	51	51	
NÄYTTEEN KORKEUS [mm]	95,1	95,5	95,9	
NÄYTTEEN POIKKIP.-ALA [cm**2]	20,43	20,43	20,43	
NÄYTTEEN TILAVUUS [cm**3]	194,27	195,09	195,91	
NÄYTTEEN PAINO [g]	348,60	348,60	348,60	
Kokoonpuristuma konsolidoinnissa [mm]	0,00	0,03	0,10	
Poistunut vesi konsolidoinnissa [ml] [g]	0,2	2,4	3,0	
Näytteen paino konsolidoituneena [g]	348,40	346,20	345,60	
Kuivan näytteen paino [g]	327,94	328,46	327,89	
VESI [g]	20,66	20,14	20,71	
VESIPITOISUUS [%]	6,3	6,1	6,3	
IRTOTIHEYS [g/cm**3]	1,79	1,79	1,78	
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]	17,6	17,5	17,5	
KUIVA IRTOTIHEYS [g/cm**3]	1,69	1,68	1,67	
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]	16,6	16,5	16,4	
KYLLÄSTYSASTE Sr, oletus [%]	100,00	100,00	100,00	
KIINTOTIHEYS [g/cm**3]	1,89	1,88	1,87	
HUOKOSLUKU e	0,12	0,12	0,12	
OMINAISTILAVUUS v	1,12	1,12	1,12	
KIINTOTIHEYS, oletus [g/cm**3]	2,98	2,98	2,98	
KYLLÄSTYSASTE Sr [%]	24,5	23,7	24,1	
HUOKOSLUKU e	0,77	0,77	0,78	
OMINAISTILAVUUS v	1,77	1,77	1,78	
KONSOLIDOITUNEENA: 30,5 kPa 61 kPa 112 kPa				
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]	17,6	17,6	17,6	
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]	16,6	16,7	16,7	
KOKEEN LOPUSSA:				
ASTIAN NUMERO	M255_A1	M255_A2	M255_A3	
KOSTEA NÄYTE [g]	387,73	386,43	383,09	
Kuivan näytteen paino [g]	327,94	328,46	327,89	
VESI [g]	59,79	57,97	55,20	
VESIPITOISUUS [%]	18,2	17,6	16,8	

w

KOLMIAKSIAALIKOE			
TTY Maa- ja pohjarakenteet PL 600 33101 TAMPERE		ASIAKAS KOHDE TYÖNUMERO Destia Oy OKTO-eriste 255/2018	
Laskennallinen paino = kokeen loppupaino + konsolidoinnissa poistunut vesi + leikkauksessa poistunut vesi			
KOKEEN / KOESELIN N:O	10	10	10
PISTE, PAALU			
SYVYYS	-	-	-
TIEDOSTO	M255_A1	M255_A2	M255_A3
NOPEUS [mm/min]	0,015	0,015	0,015
LASKENNALLISESTI 20 kPa:n sellipaineessa ennen konsolidointia:			
NÄYTTEEN HALKAISIJA [mm]	51	51	51
NÄYTTEEN KORKEUS [mm]	95,1	95,5	95,9
NÄYTTEEN POIKKIP.-ALA [cm**2]	20,43	20,43	20,43
NÄYTTEEN TILAVUUS [cm**3]	194,27	195,09	195,91
NÄYTTEEN PAINO LASKENNALLISESTI [g]	373,5	377,6	380,2
Kokoonturistuma konsolidoinnissa [mm]	0,00	0,03	0,10
Poistunut vesi konsolidoinnissa [ml],[g]	0,2	2,4	3,0
Näytteen paino konsolidoituneena [g]	373,25	375,16	377,17
Kuivan näytteen paino [g]	327,94	328,46	327,89
VESI [g]	45,51	49,10	52,28
VESIPITOISUUS [%]	13,9	14,9	15,9
IRTOTIHEYS [g/cm**3]	1,92	1,94	1,94
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]	18,9	19,0	19,0
KUIVA IRTOTIHEYS [g/cm**3]	1,69	1,68	1,67
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]	16,6	16,5	16,4
KYLLÄSTYSASTE Sr, oletus [%]	100,0	100,0	100,0
KIINTOTIHEYS [g/cm**3]	2,20	2,25	2,28
HUOKOSLUKU e	0,31	0,34	0,36
OMINAISTILAVUUS v	1,31	1,34	1,36
KIINTOTIHEYS, oletus [g/cm**3]	2,98	2,98	2,98
KYLLÄSTYSASTE Sr [%]	54,0	57,9	60,9
HUOKOSLUKU e	0,77	0,77	0,78
OMINAISTILAVUUS v	1,77	1,77	1,78
KONSOLIDOITUNEENA:			
	30,5 kPa	61 kPa	112 kPa
"TILAVUUSPAINO" [kN/m**3]	18,9	19,1	19,2
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]	16,6	16,7	16,7
KOKEEN LOPUSSA:			
ASTIAN NUMERO	M255_A1	M255_A2	M255_A3
KOSTEA NÄYTE [g]	387,73	386,43	383,09
Kuivan näytteen paino [g]	327,94	328,46	327,89
VESI [g]	59,79	57,97	55,20
VESIPITOISUUS [%]	18,2	17,6	16,8
0			
0			
Laskennallinen paino = Koekpl:een paino kokeen lopussa + konsolidoinnissa poistunut vesi (ei välttämättä oikein)			

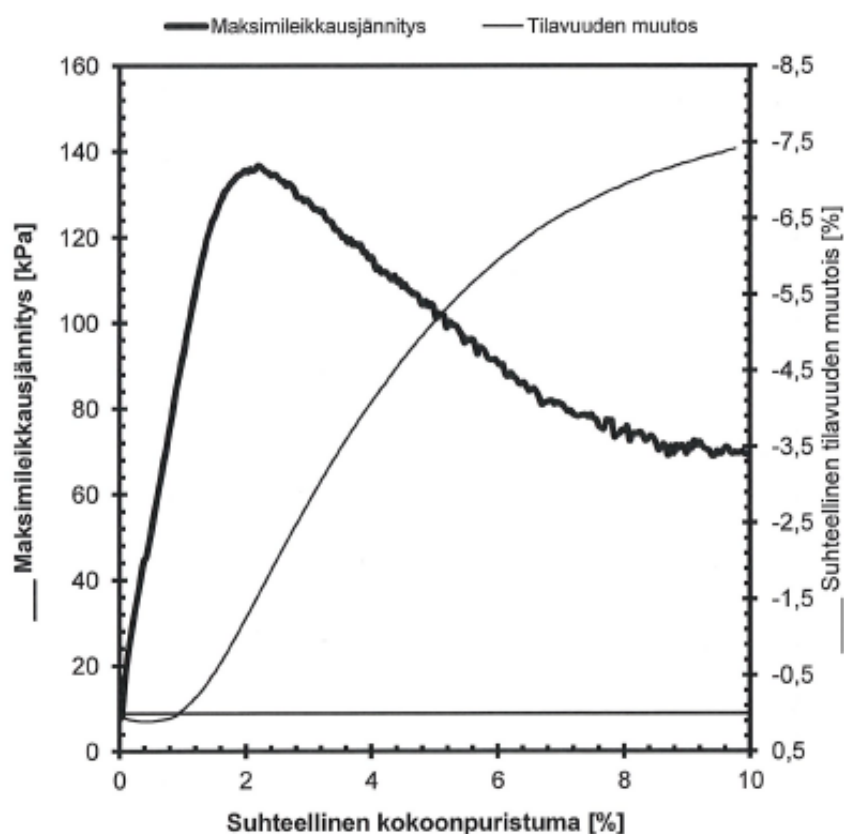
W

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	OKTO-eriste
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

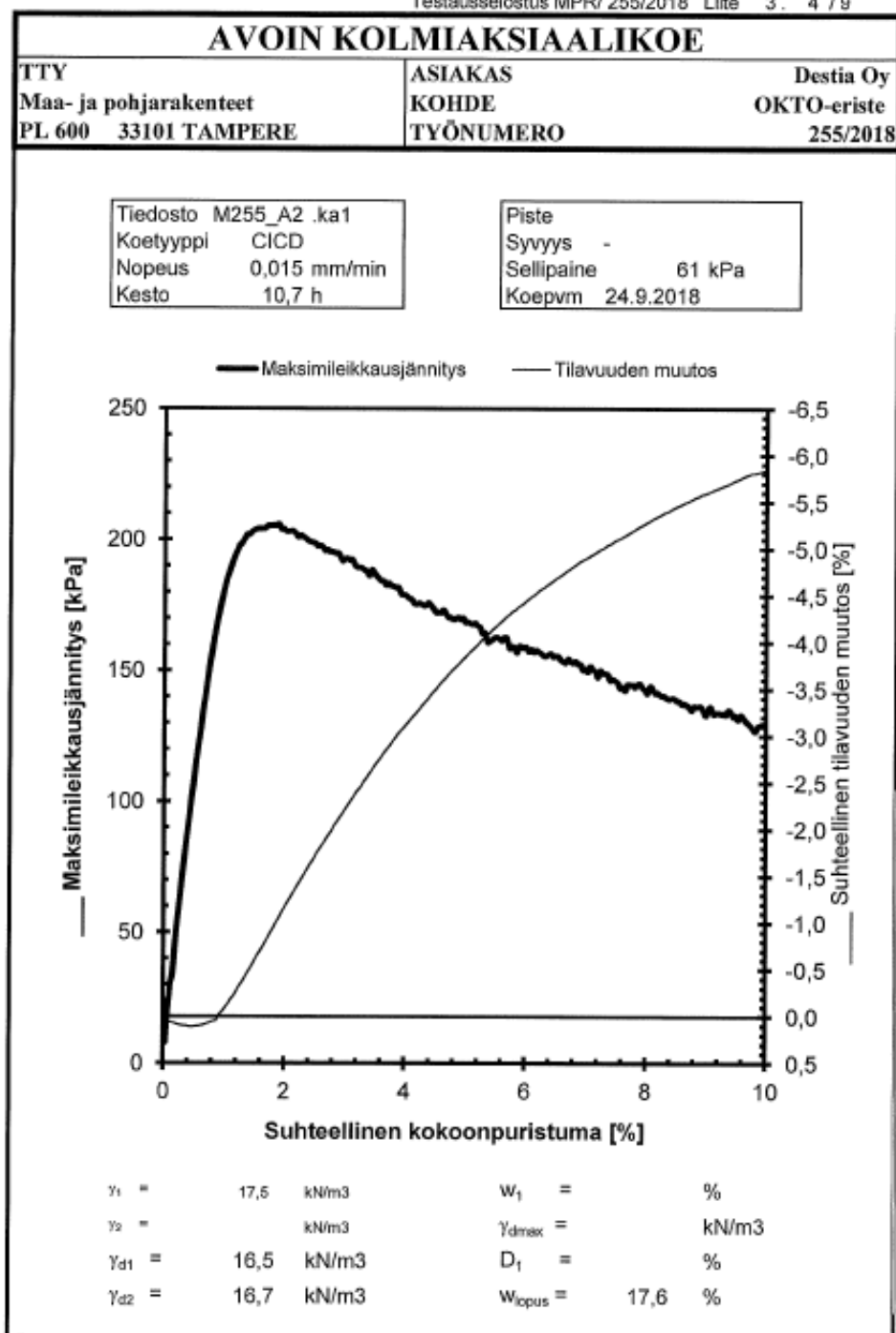
Tiedosto M255_A1 .ka1
Koetyyppi CICD
Nopeus 0,015 mm/min
Kesto 10,6 h

Piste
Syvyys -
Sellipaine 31 kPa
Koepvm 17.9.2018



γ_1	=	17,6	kN/m ³	w_1	=		%
γ_2	=		kN/m ³	γ_{dmax}	=		kN/m ³
γ_{d1}	=	16,6	kN/m ³	D_1	=		%
γ_{d2}	=	16,6	kN/m ³	w_{lopus}	=	18,2	%

WV

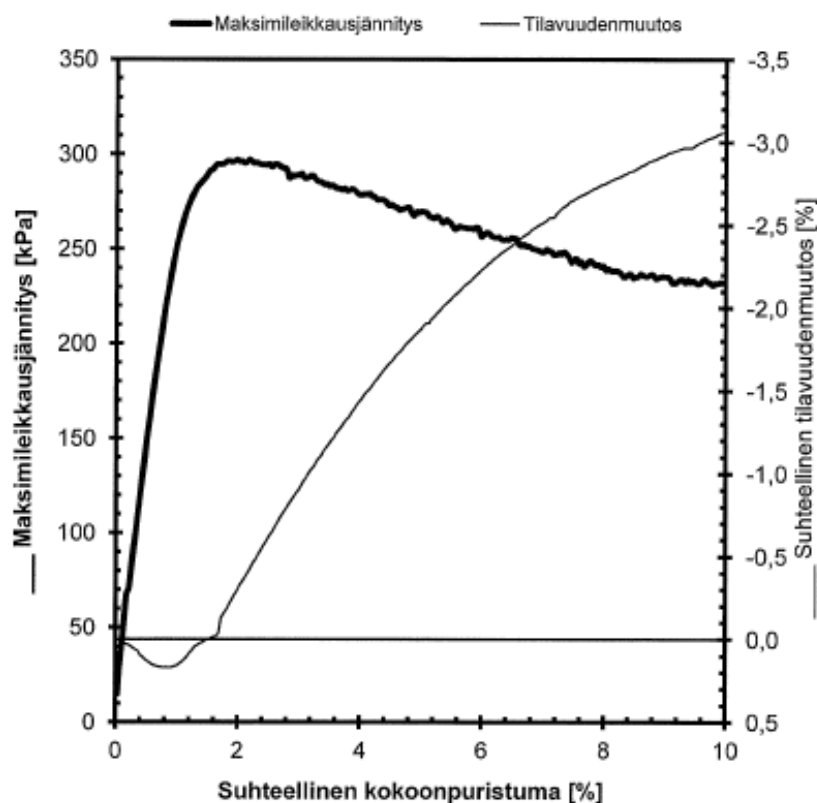


AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	OKTO-eriste
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Tiedosto M255_A3 .ka1
 Koetyyppi CICD
 Nopeus 0,015 mm/min
 Kesto 10,7 h

Piste
 Syvyys -
 Sellipaine 112 kPa
 Koepvm 25.9.2018



γ_1	=	17,5	kN/m ³	W_1	=	%
γ_2	=		kN/m ³	γ_{dmax}	=	kN/m ³
γ_{d1}	=	16,4	kN/m ³	D_1	=	%
γ_{d2}	=	16,7	kN/m ³	W_{opus}	=	16,8 %

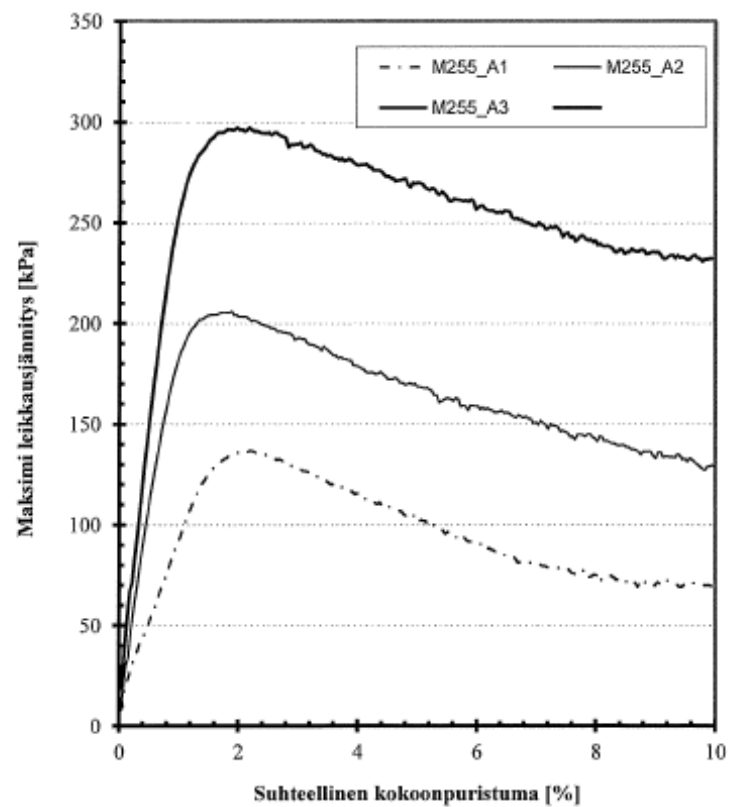
WV

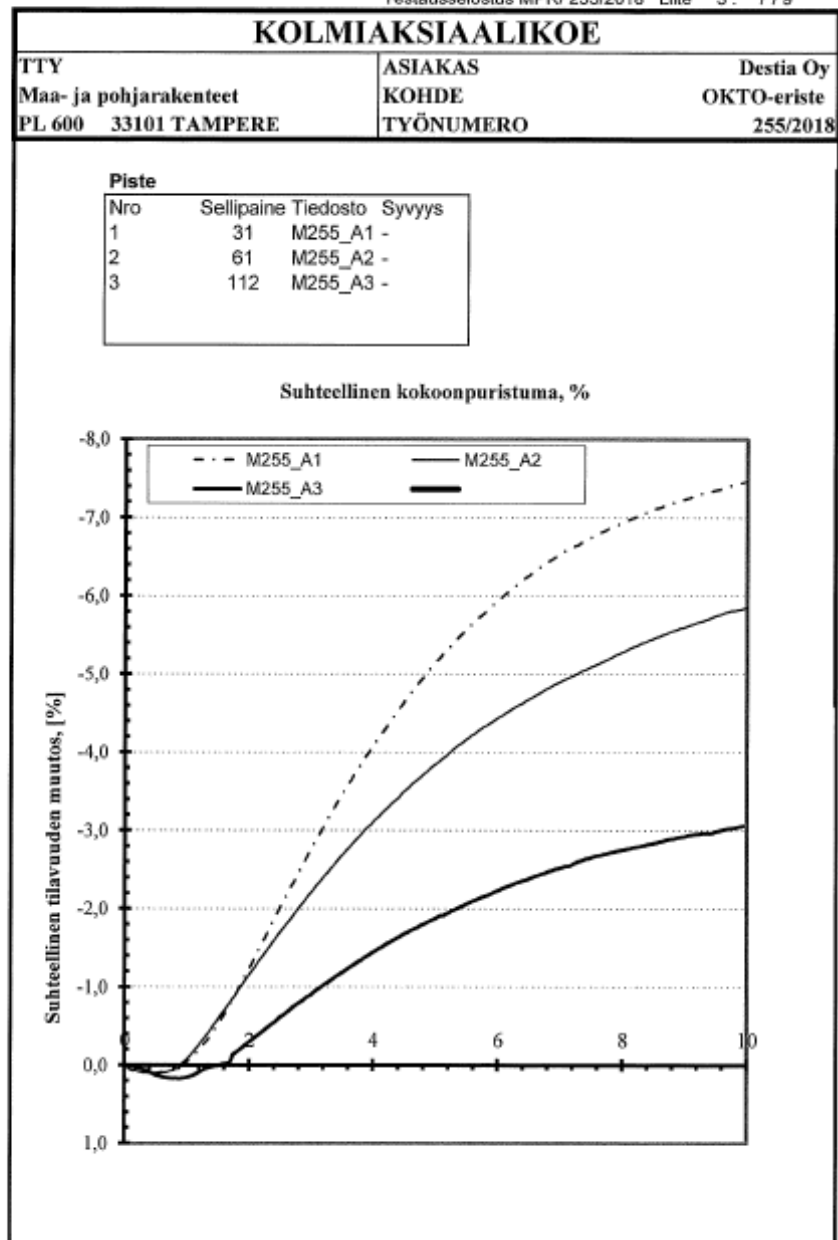
KOLMIAKSIAALIKOE

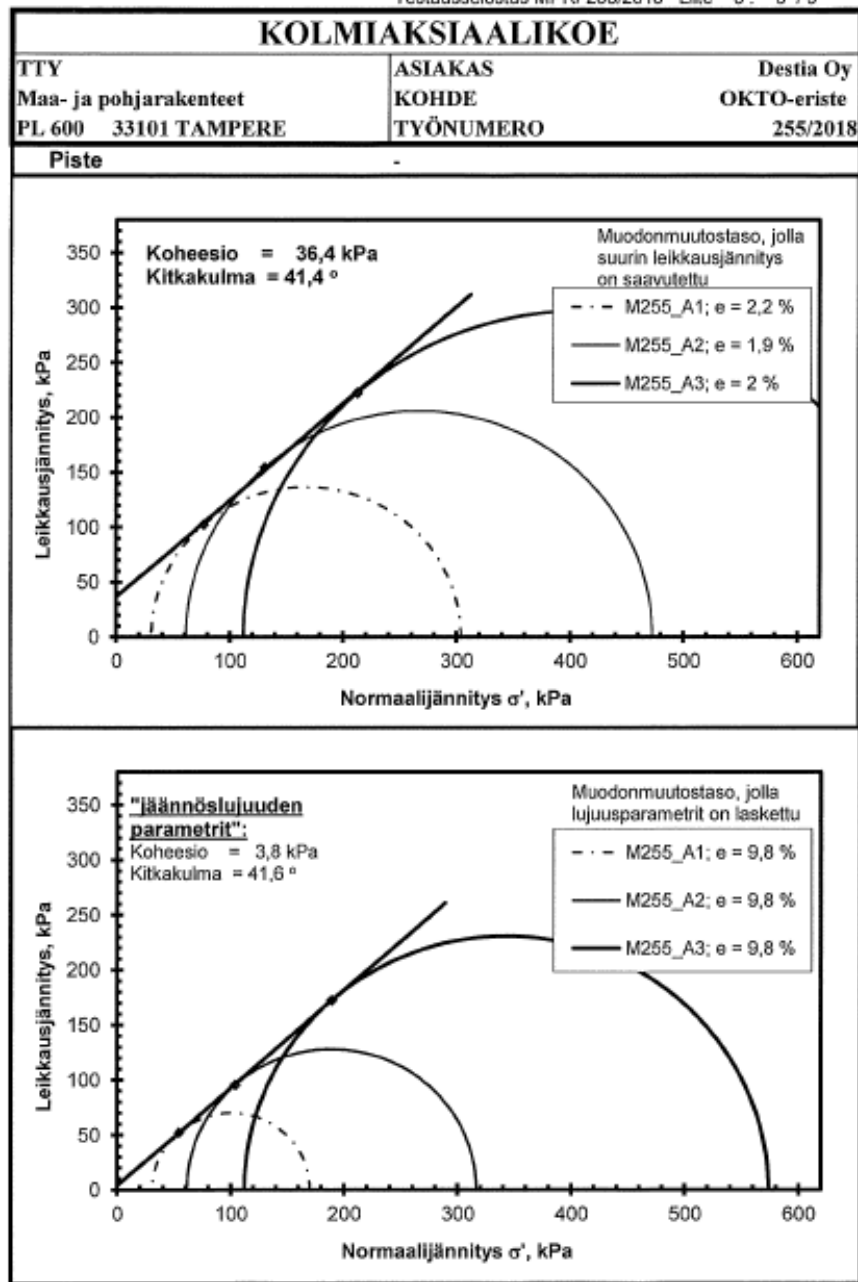
TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	OKTO-eriste
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

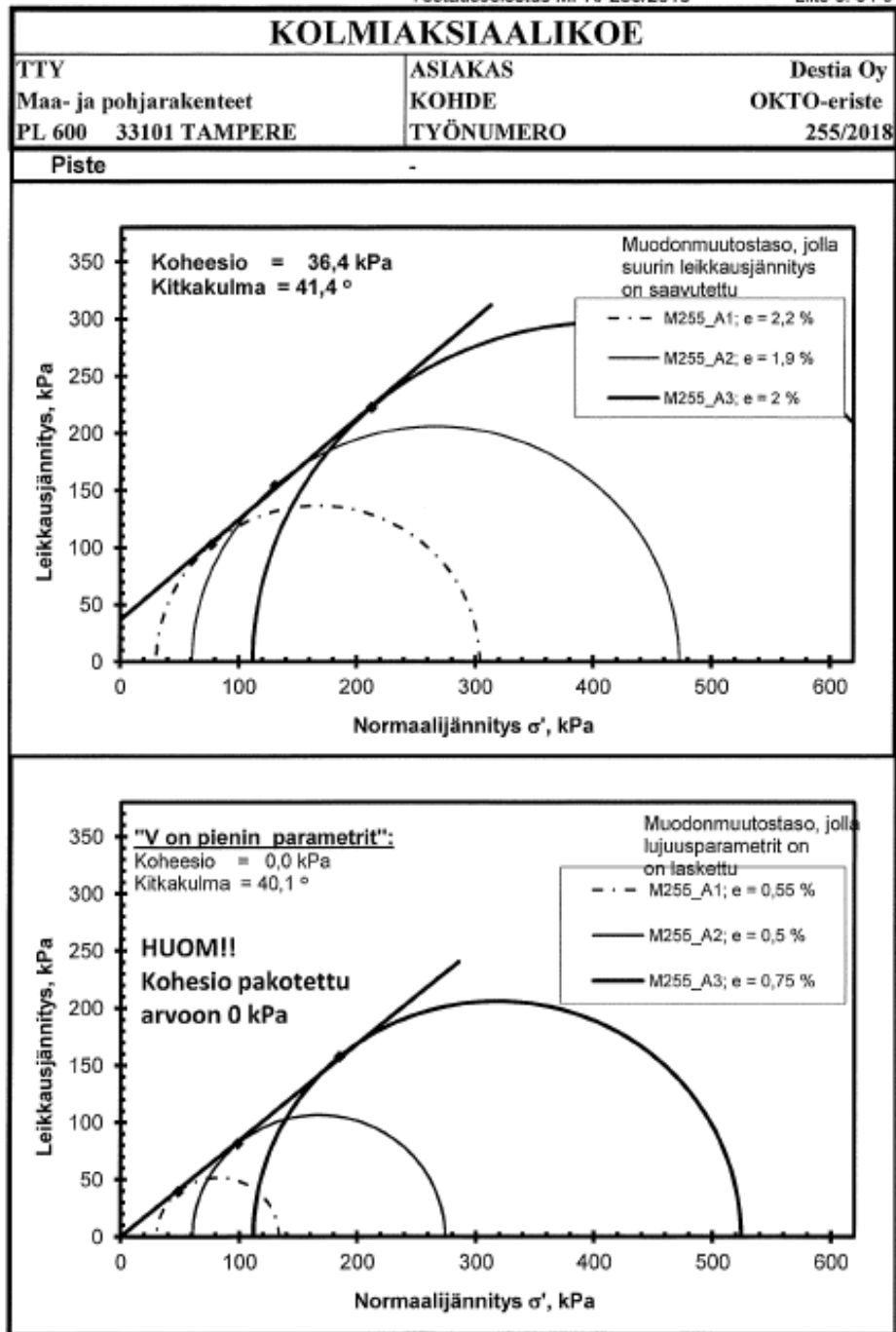
Piste

Nro	Sellipaine	Tiedosto	Syvyys
1	31	M255_A1 -	
2	61	M255_A2 -	
3	112	M255_A3 -	









wv

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE				
TTY		ASIAKAS		Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet		KOHDE		Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE		TYÖNUMERO		255/2018
KOKEEN / KOESELLIN N:O		10	10	10
PISTE, PAALU		-	-	-
SYVYYS [m]		-	0,0	-
TIEDOSTO		M255_A4	M255_A5	M255_A6A
NOPEUS [mm/min]		0,015	0,015	0,015
KOKEEN ALUSSA SULLOTTUNA:	pvm	13.9.2018	18.9.2018	25.9.2018
NÄYTTEEN HALKAISIJA [mm]		51	51	51
NÄYTTEEN KORKEUS [mm]		98,3	98	98,5
NÄYTTEEN POIKKIP.-ALA [cm**2]		20,43	20,43	20,43
NÄYTTEEN TILAVUUS [cm**3]		200,81	200,20	201,22
NÄYTTEEN PAINO [g]		364,76	364,50	364,83
Kokoonpuristuma konsolidoinnissa [mm]		0,16	0,20	0,32
Poistunut vesi konsolidoinnissa [ml], [g]		1,4	2,0	9,8
Näytteen paino konsolidoituneena [g]		363,36	362,50	355,03
Kuivan näytteen paino [g]		343,53	341,38	343,80
VESI [g]		21,23	23,12	21,03
VESIPITOISUUS [%]		6,2	6,8	6,1
IRTOTIHEYS [g/cm**3]		1,82	1,82	1,81
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]		17,8	17,9	17,8
KUIVA IRTOTIHEYS [g/cm**3]		1,71	1,71	1,71
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]		16,8	16,7	16,8
KYLLÄSTYSASTE Sr, oletus [%]		100,00	100,00	100,00
KIINTOTIHEYS [g/cm**3]		1,91	1,93	1,91
HUOKOSLUKU e		0,12	0,13	0,12
OMINAISTILAVUUS v		1,12	1,13	1,12
KIINTOTIHEYS, oletus [g/cm**3]		2,65	2,65	2,65
KYLLÄSTYSASTE Sr [%]		29,8	32,4	29,4
HUOKOSLUKU e		0,55	0,55	0,55
OMINAISTILAVUUS v		1,55	1,55	1,55
KONSOLIDOITUNEENA:		50,5 kPa	100 kPa	204 kPa
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]		17,9	17,9	18,2
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]		16,9	16,9	17,6
KOKEEN LOPUSSA:				
ASTIAN NUMERO		M255_A4	M255_A5	M255_A6A
KOSTEA NÄYTE [g]		391,19	385,86	382,66
Kuivan näytteen paino [g]		343,53	341,38	343,80
VESI [g]		47,66	44,48	38,86
VESIPITOISUUS [%]		13,9	13,0	11,3

UV

Testausselostus MPR/ 255/2018

Liite 4. 2 / 10

KOLMIAKSIAALIKOE				
TTY		ASIAKAS		Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet		KOHDE		Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE		TYÖNUMERO		255/2018
Laskennallinen paino = kokeen loppupaino + konsolidoinnissa poistunut vesi + leikkauksessa poistunut vesi				
KOKEEN / KOESELIN N:O		10	10	10
PISTE, PAALU		-	-	-
SYVYYS		-	0	-
TIEDOSTO		M255 A4	M255 A5	M255 A6A
NOPEUS [mm/min]		0,015	0,015	0,015
LASKENNALLISESTI 25 kPa:n sellipaineessa ennen konsolidointia:				
NÄYTTEEN HALKAISUJA [mm]		51	51	51
NÄYTTEEN KORKEUS [mm]		98,3	98,0	98,5
NÄYTTEEN POIKKIP.-ALA [cm**2]		20,43	20,43	20,43
NÄYTTEEN TILAVUUS [cm**3]		200,81	200,20	201,22
NÄYTTEEN PAINO LASKENNALLISESTI [g]		388,1	383,0	395,2
Kokoonpuristuma konsolidoinnissa [mm]		0,16	0,20	0,32
Poistunut vesi konsolidoinnissa [ml], [g]		1,4	2,0	9,8
Näytteen paino konsolidoituneena [g]		386,72	380,98	385,36
Kuivan näytteen paino [g]		343,53	341,38	343,80
VESI [g]		44,59	41,60	51,36
VESIPITOISUUS [%]		13,0	12,2	14,9
IRTOTIHEYS [g/cm**3]		1,93	1,91	1,96
TILAVUUSPAINO [kN/m**3]		19,0	18,8	19,3
KUIVA IRTOTIHEYS [g/cm**3]		1,71	1,71	1,71
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]		16,8	16,7	16,8
KYLLÄSTYSASTE Sr, oletus [%]		100,0	100,0	100,0
KIINTOTIHEYS [g/cm**3]		2,20	2,15	2,29
HUOKOSLUKU e		0,29	0,26	0,34
OMINAISTILAVUUS v		1,29	1,26	1,34
KIINTOTIHEYS, oletus [g/cm**3]		2,65	2,65	2,65
KYLLÄSTYSASTE Sr [%]		62,7	58,3	71,8
HUOKOSLUKU e		0,55	0,55	0,55
OMINAISTILAVUUS v		1,55	1,55	1,55
KONSOLIDOITUNEENA:				
		50,5 kPa	100 kPa	204 kPa
"TILAVUUSPAINO" [kN/m**3]		19,0	18,9	19,7
KUIVATILAVUUSPAINO [kN/m**3]		16,9	16,9	17,6
KOKEEN LOPUSSA:				
ASTIAN NUMERO		M255 A4	M255 A5	M255 A6A
KOSTEA NÄYTE [g]		391,19	385,86	382,66
Kuivan näytteen paino [g]		343,53	341,38	343,80
VESI [g]		47,66	44,48	38,86
VESIPITOISUUS [%]		13,9	13,0	11,3
0				
0				
Laskennallinen paino = Kockpl:een paino kokeen lopussa + konsolidoinnissa poistunut vesi (ei välttämättä oikein)				

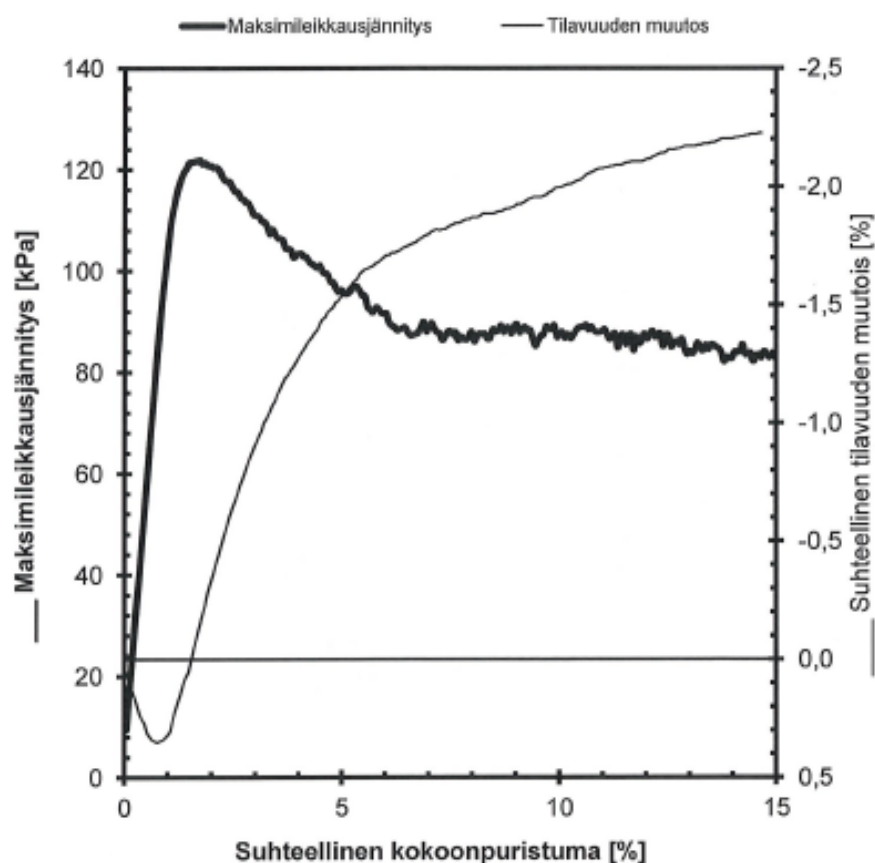
uv

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Tiedosto M255_A4 .ka1
Koetyyppi C1CD
Nopeus 0,015 mm/min
Kesto 16,4 h

Piste -
Syvyys -
Sellipaine 50,5 kPa
Koepvm 13.12.2018



γ_1	=	17,8	kN/m ³	w_1	=		%
γ_2	=		kN/m ³	γ_{dmax}	=		kN/m ³
γ_{d1}	=	16,8	kN/m ³	D_1	=		%
γ_{d2}	=	16,9	kN/m ³	w_{lopus}	=	13,9	%

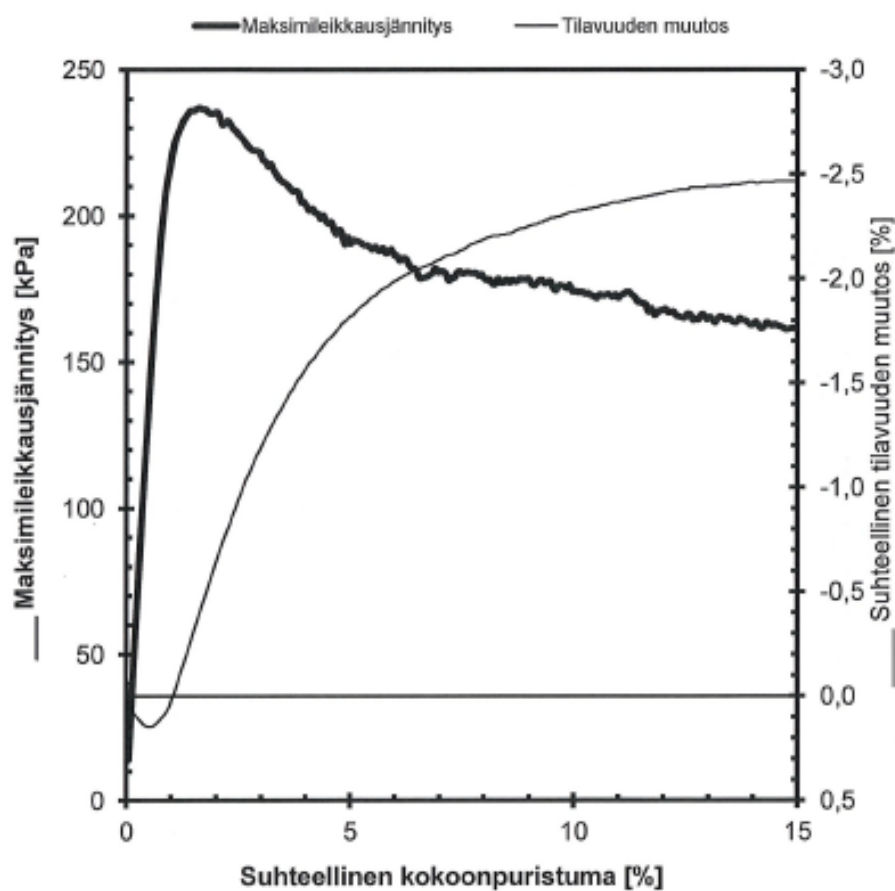
WV

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Tiedosto M255_A5 .ka1
Koetyyppi C1CD
Nopeus 0,015 mm/min
Kesto 16,4 h

Piste -
Syvyys -
Sellipaine 100 kPa
Koepvm 14.12.2018



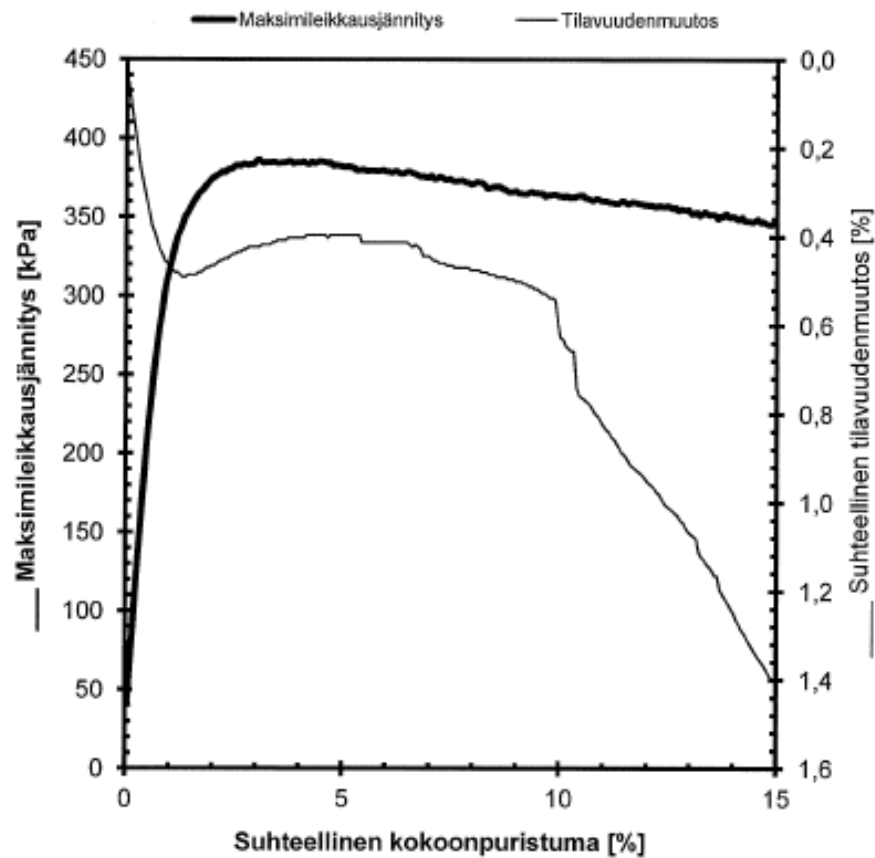
γ_1 =	17,9	kN/m ³	W_1 =	%
γ_2 =		kN/m ³	γ_{dmax} =	kN/m ³
γ_{d1} =	16,7	kN/m ³	D_1 =	%
γ_{d2} =	16,9	kN/m ³	w_{lopus} =	13,0 %

AVOIN KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Tiedosto 1255_A6A .ka1
Koetyyppi C1CD
Nopeus 0,015 mm/min
Kesto 16,5 h

Piste -
Syvyys -
Sellipaine 204 kPa
Koepvm 20.12.2018



γ_1	=	17,8	kN/m ³	w_1	=	%
γ_2	=		kN/m ³	γ_{dmax}	=	kN/m ³
γ_{d1}	=	16,8	kN/m ³	D_1	=	%
γ_{d2}	=	17,6	kN/m ³	w_{opus}	=	11,3 %

WV

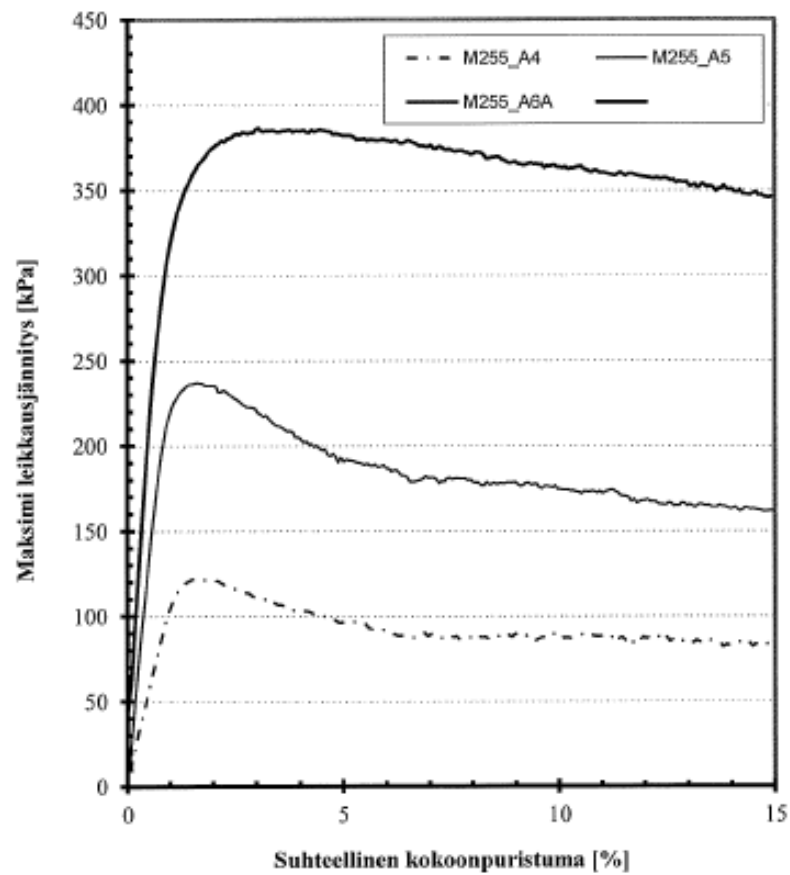
KOLMIAKSIAALIKOE

TTY
Maa- ja pohjarakenteet
PL 600 33101 TAMPERE

ASIAKAS
KOHDE
TYÖNUMERO

Destia Oy
Vertailuhiekka (100 MPa)
255/2018

Piste -			
Nro	Sellipaine	Tiedosto	Syvyys
1	51	M255_A4 -	
2	100	M255_A5 -	
3	204	M255_A6 -	



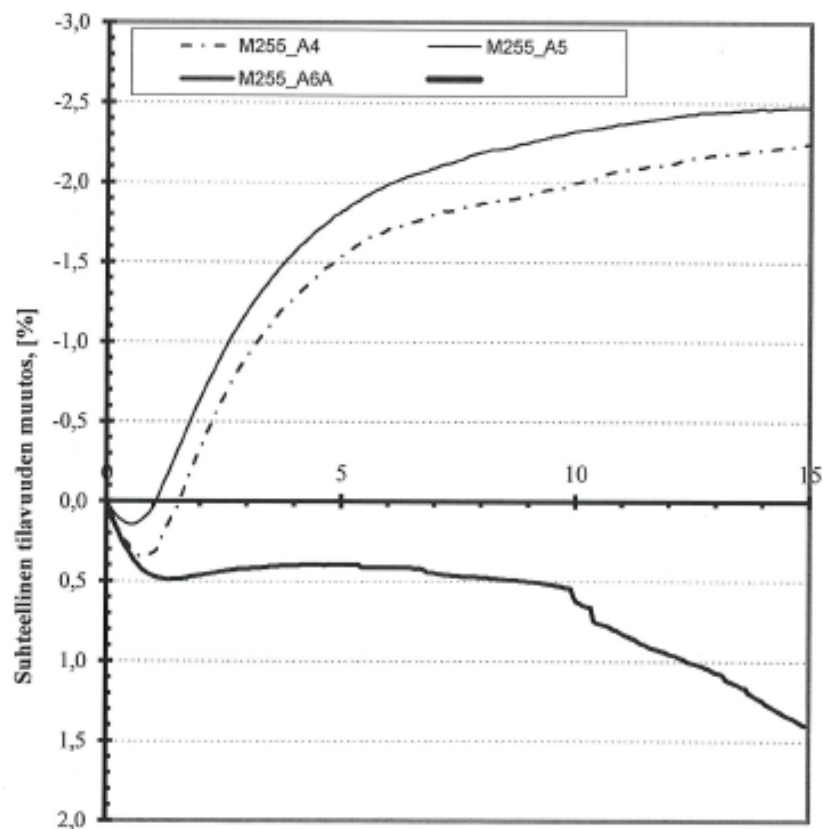
WV

KOLMIAKSIAALIKOE

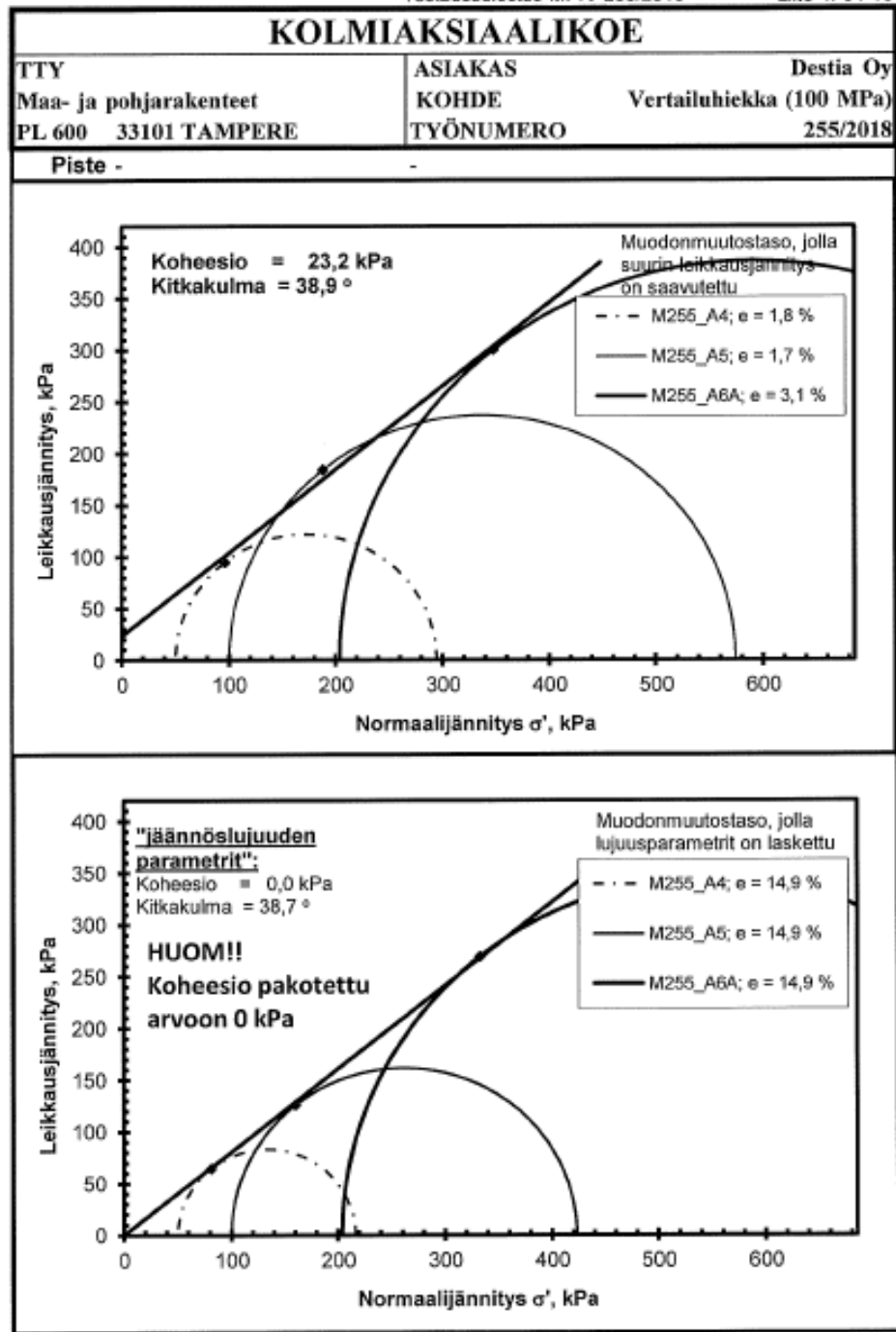
TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Piste	-
Nro	Sellipaine Tiedosto Syvyys
1	51 M255_A4 -
2	100 M255_A5 -
3	204 M255_A6 -

Suhteellinen kokoonpuristuma, %



WV

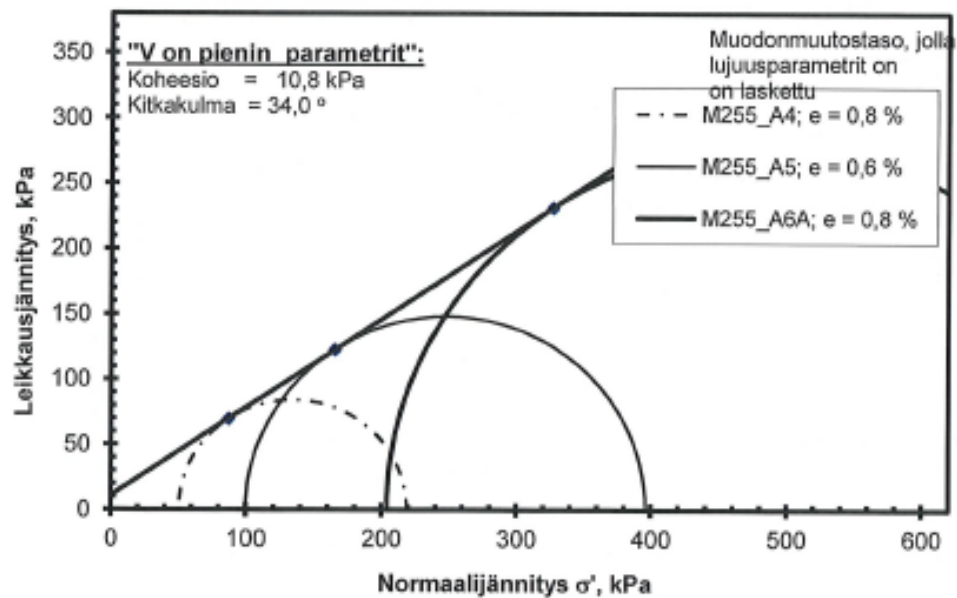
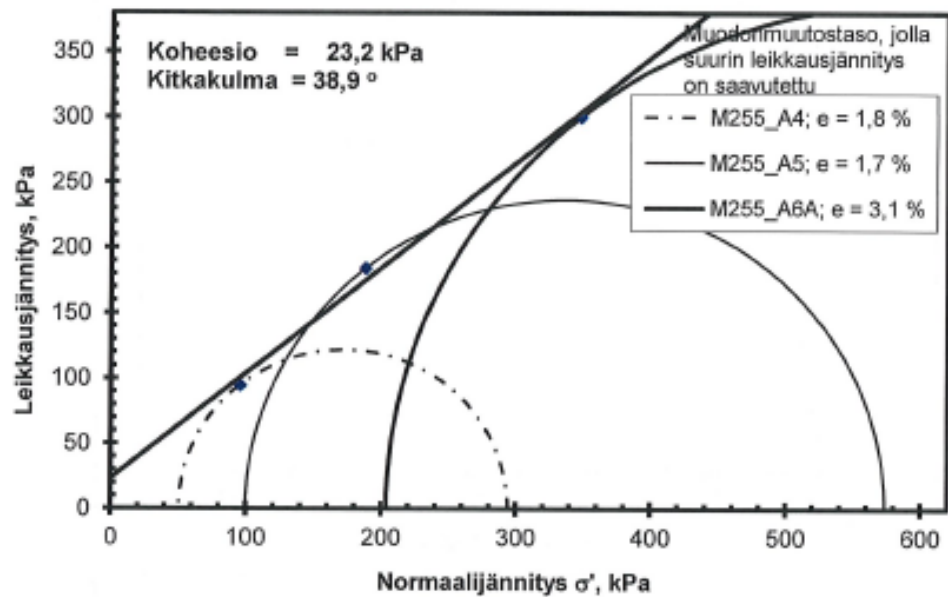


WV

KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Piste -



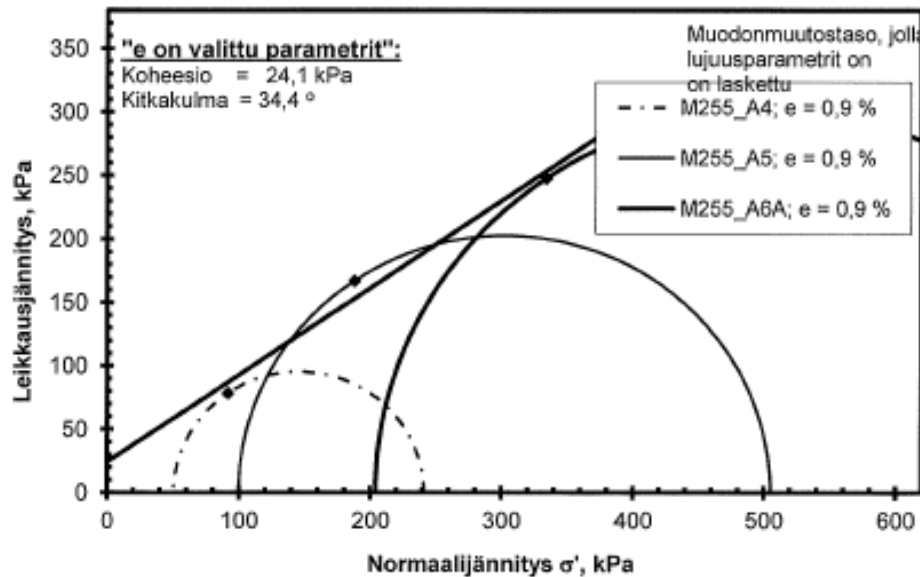
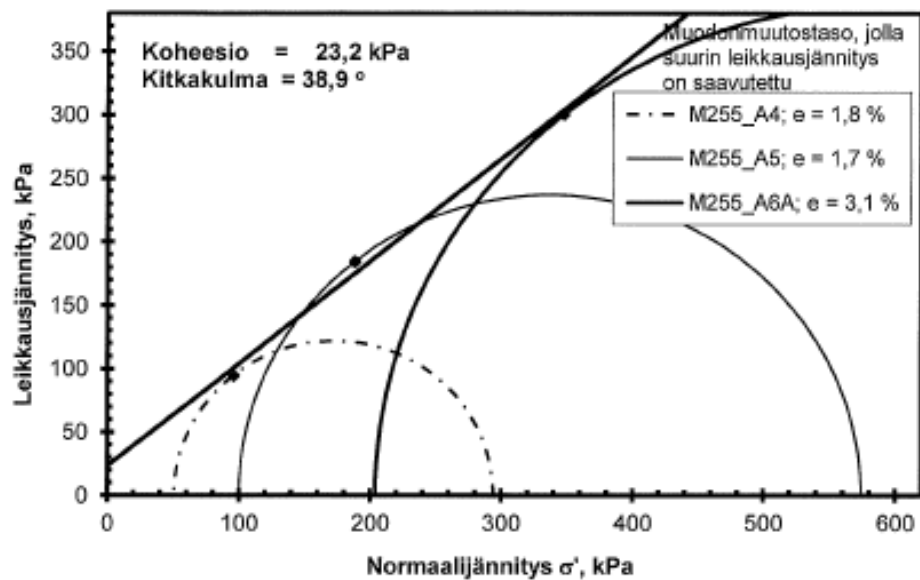
wv

KOLMIAKSIAALIKOE

TTY	ASIAKAS	Destia Oy
Maa- ja pohjarakenteet	KOHDE	Vertailuhiekka (100 MPa)
PL 600 33101 TAMPERE	TYÖNUMERO	255/2018

Piste -

-



WV